



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ENERGETICKÝ ÚSTAV**

ENERGY INSTITUTE

**ELEKTROSTATICKÝ ODLUČOVAČ PRO DOMOVNÍ  
SPALOVACÍ ZAŘÍZENÍ SPALUJÍCÍ DŘEVNÍ PALIVA**

SMALL-SCALE ELECTROSTATIC PRECIPITATOR FOR DOMESTIC WOOD-BURNING APPLIANCES

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Tomáš Kantor**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Marian Brázdil, Ph.D.**

**BRNO 2020**



# Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: **Bc. Tomáš Kantor**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Energetické inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Marian Brázdil, Ph.D.**  
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## **Elektrostatický odlučovač pro domovní spalovací zařízení spalující dřevní paliva**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Emise tuhých částic z malých domovních spalovacích zařízení – krbů, krbových vložek, kamen nebo teplovodních kotlů představují významný zdroj znečišťujících látek. Elektrostatické odlučovače umožňují zachytávat tuhé částice v širokém spektru velikostních frakcí. Představují jeden z možných způsobů redukce tuhých znečišťujících látek.

### **Cíle diplomové práce:**

Popis principů elektrostatického odlučování.

Rešerše existujících elektrostatických odlučovačů pro domovní spalovací zařízení a jejich parametrů.

Konstrukční návrh experimentálního elektrostatického odlučovače pro domovní spalovací zařízení.

### **Seznam doporučené literatury:**

PARKER, K. R. Applied Electrostatic Precipitation. 1st. ed. Springer, Netherlands, 1997. ISBN: 978--7514-0266-7

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá návrhem elektrostatického odlučovače pro domovní spalovací zařízení spalující dřevní paliva. V úvodních kapitolách je popsán princip elektrostatického odlučování a zpracována rešerše existujících elektrostatických odlučovačů pro domovní spalovací zařízení. V praktické části práce byl vytvořen matematický model elektrostatického odlučovače, na jehož základě byla navržena konstrukce elektrostatického odlučovače a predikovány jeho výkonové parametry.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Elektrostatický odlučovač, koronový výboj, tuhé znečišťující látky, domovní spalovací zařízení, spalování, biomasa, emise

## **ABSTRACT**

Master thesis deals with design of electrostatic precipitator for domestic wood-burning appliances. In the opening chapters, principles of electrostatic precipitation are described and a study of existing electrostatic precipitators for domestic combustion devices is made. In the practical part of the thesis, a mathematical model of electrostatic precipitator was created. Based on the mathematical model, electrostatic precipitator was designed and its performance parameters predicted.

## **KEY WORDS**

Electrostatic precipitator, corona discharge, particulate matter, small scale combustion devices, combustion, biomass, emission



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KANTOR, Tomáš. *Elektrostatický odlučovač pro domovní spalovací zařízení spalující dřevní paliva*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124866>.

Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Marian Brázdil.





## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Elektrostatický odlučovač pro domovní spalovací zařízení spalující dřevní paliva** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

26. 6. 2020

---

Tomáš Kantor



## **PODĚKOVÁNÍ**

Touto cestou bych rád poděkoval panu Ing. Marianu Brázdilovi Ph.D. za cenné rady, připomínky a úsilí, věnované do vedení mé diplomové práce. Děkuji také panu Ing. Liboru Kudelovi za pomoc při zpracování výkresové dokumentace.

Velké díky bych chtěl vyjádřit svým rodičům za neutuchající podporu nejen při studiu. Bez nich by tato práce nevznikla.



## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

$A$	$[m^2]$	Průřez sběrací elektrody
$\alpha$	$[-]$	Součinitel přebytku vzduchu
$b$	$[m^2 \cdot V_s^{-1}]$	Pohyblivost iontů
$b_0$	$[m^2 \cdot V_s^{-1}]$	Pohyblivost iontů za normálních podmínek
$b_s$	$[-]$	Empirická konstanta pro výpočet účinnosti dle Smidthe
$C$	$[-]$	Cunninghamův korekční faktor
$c$	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost proudění spalin
$d$	$[m]$	Průměr sběrací elektrody (trubky)
$d_p$	$[m]$	Průměr částice
$\delta$	$[-]$	Relativní hustota plynu
$E$	$[V \cdot m^{-1}]$	Intenzita elektrického pole
$E_0$	$[V \cdot m^{-1}]$	Počáteční intenzita elektrického pole
$\epsilon_r$	$[-]$	Relativní permitivita
$\epsilon_0$	$[F \cdot m^{-1}]$	Permitivita vakua
$F_e$	$[N]$	Elektrostatická síla
$f$	$[-]$	Faktor drsnosti povrchu elektrod
$f_s$	$[-]$	Faktor poměrného zvětšení objemu suchého vzduchu
$\varphi$	$[\%]$	Relativní vlhkost vzduchu
$i$	$[A]$	Elektrický proud
$j$	$[A \cdot m^{-2}]$	Hustota elektrického proudu
$l$	$[m]$	Délka elektrody
$\lambda$	$[m]$	Střední volná dráha molekul plynu mezi srážkami
$\dot{m}_h$	$[kg \cdot h^{-1}]$	Tok paliva
$N_{De}$	$[-]$	Deutschovo číslo
$\eta$	$[-]$	Účinnost
$\mu$	$[kg \cdot m^{-1} s^{-1}]$	Dynamická viskozita
$P$	$[W]$	Elektrický výkon (příkon)
$p_c$	$[Pa]$	Celkový absolutní tlak
$p''$	$[Pa]$	Absolutní tlak vodní páry na mezi sytosti při dané teplotě vzduchu
$Q_p$	$[C]$	Velikost elektrického náboje částice

$Q^r$	$[MJ \cdot kg^{-1}]$	Výhřevnost
$Q^s$	$[MJ \cdot kg^{-1}]$	Spalné teplo
$\dot{Q}_s$	$[m^3 \cdot kg^{-1}]$	Průtok spalin
$R$	$[m]$	Poloměr sběrací elektrody
$r_0$	$[m]$	Poloměr nabíjecí elektrody
$Re$	$[-]$	Reynoldsovo podobnostní kritérium
$\rho_s$	$[kg \cdot m^{-3}]$	Hustota spalin
$\rho_v$	$[\Omega \cdot m]$	Měrný odpor vrstvy prachu
$S$	$[m^2]$	Obsah funkční plochy sběrací elektrody
$s_v$	$[m]$	Tloušťka vrstvy prachu
$U$	$[V]$	Elektrické napětí
$U_0$	$[V]$	Počáteční elektrické napětí
$U_{kr}$	$[V]$	Kritické (počáteční) napětí
$U_p$	$[V]$	Přeskokové jiskrové napětí
$(\Delta U)_v$	$[V]$	Spád napětí
$V_{H_2O}$	$[-]$	Objem vodní páry za daných okolních podmínek
$V_{O_2min}$	$[m_{O_2}^3 \cdot kg^{-1}]$	Minimální objemová spotřeba kyslíku
$V_{sp}$	$[m_{sp}^3 \cdot kg^{-1}]$	Skutečný objem spalin
$V_{spmin}$	$[m_{sp}^3 \cdot kg^{-1}]$	Minimální (teoretický) objem vlhkých spalin
$V_{spmin}^s$	$[m_{sp}^3 \cdot kg^{-1}]$	Minimální (teoretický) objem suchých spalin
$V_{vz}$	$[m_{vz}^3 \cdot kg^{-1}]$	Skutečný objem přivedeného vzduchu
$V_{vzmin}$	$[m_{vz}^3 \cdot kg^{-1}]$	Minimální objemová spotřeba vlhkého vzduchu
$V_{vzmin}^s$	$[m_{vz}^3 \cdot kg^{-1}]$	Minimální objemová spotřeba suchého vzduchu
$W^r$	$[-]$	Vlhkost v palivu
$w_{th}$	$[m \cdot s^{-1}]$	Teoretická odlučovací rychlost

D–A	Deutsch–Andersonův model výpočtu odlučivosti
ESP	Elektrostatický odlučovač
M–Ö	Matts–Öhnfeldtův model výpočtu odlučivosti
TZL	Tuhé znečišťující látky

## **OBSAH**

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	13
ÚVOD .....	17
1. BIOMASA .....	18
1.1 Pelety .....	18
1.2 Charakteristické vlastnosti a prvkové složení pelet dle normy EN 14961-2..	19
2. Tuhé znečišťující látky (TZL).....	21
2.1 Vliv TZL na člověka.....	22
2.2 Velikost a tvar částic.....	23
2.3 Elektrický odpor částic .....	24
2.4 Relativní permitivita .....	24
3. ELEKTROSTATICKÉ ODLUČOVÁNÍ ČÁSTIC .....	25
3.1 Elektrický výboj v plynech.....	25
3.2 Fyzikální princip elektrostatického odlučování a koronový výboj .....	26
3.3 Vznik ozónu.....	32
3.4 Odlučovače částic .....	33
3.5 Odlučovače pro kotle malých výkonů .....	38
4. PRŮZKUM TRHU S ELEKTROSTATICKÝMI ODLUČOVAČI PRO KOTLE MALÝCH VÝKONŮ .....	40
4.1 Ökotube (Švýcarsko) .....	41
4.2 Zumikron (Německo) .....	43
4.3 Al-top (Německo).....	44
4.4 Airjekt 1 (Německo).....	46
4.5 Carola (Německo).....	47
4.6 Residential ESP (Norsko).....	49
4.7 Dry ESP (Německo) .....	51
4.8 Ruff-kat ESP (Rakousko) .....	52
4.9 Tabulkové porovnání elektrostatických odlučovačů částic .....	54
4.10 Shrnutí .....	55
5. NÁVRH ELEKTROSTATICKEHO ODLUČOVAČE.....	56
5.1 Spalování .....	58

5.2	Elektrostatický odlučovač částic .....	64
5.3	Matematický model výpočtu a jeho scénáře.....	70
5.4	Validace modelu na komerčních odlučovačích .....	80
5.5	Zvolená geometrická konfigurace a návrh odlučovače .....	82
ZÁVĚR.....		91
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....		93
SEZNAM OBRÁZKŮ .....		97
SEZNAM TABULEK.....		100
SEZNAM PŘÍLOH .....		101



## ÚVOD

Emise tuhých částic při spalovacích procesech je dlouhodobě diskutované téma nejen na poli energetiky. Malá domovní spalovací zařízení, jako jsou krby, krbové vložky, kamna nebo teplovodní kotle spalující uhlí nebo biomasu, mají významný podíl na znečištění ovzduší. V České republice představuje podíl emisí z malých spalovacích zařízení do tepelného výkonu 300 kW více než 30 % z celkové produkce [1]. To může vést k smogovým situacím ve městech a větších aglomeracích a z dlouhodobého hlediska působit nepříznivě na zdraví lidí. Přestože je biomasa považována vzhledem k uhlíkové neutralitě za obnovitelný zdroj energie, není bezemisní. Produkuje mnohdy více škodlivin než například spalování zemního plynu. V souvislosti s tímto je sledována produkce velmi malých částic o velikostech do 10  $\mu\text{m}$ , které vznikají při spalování a mohou mít kromě již dokázaných a popsáných ekologických dopadů také vliv na lidské zdraví a být příčinou mnoha onemocnění (respiračních, kardiovaskulárních, aj.). Jedním ze způsobů, jak vznikající emise omezit je čištění spalin pomocí odlučovačů a filtrů. Elektrostatické odlučovače umožňují zachytávat tuhé částice v širokém spektru velikostních frakcí. Předkládaná práce se z tohoto důvodu zabývá návrhem elektrostatického odlučovače. [2; 1]

Diplomová práce je rozdělena do několika kapitol. První a druhá kapitola popisují biomasu a tuhé znečišťující látky. V třetí kapitole je popsán princip elektrostatického odlučování a popis elektrostatických aplikací, včetně těch pro malá spalovací zařízení. Ve čtvrté kapitole je zpracován přehled existujících elektrostatických odlučovačů určených pro domovní spalovací zařízení – komerčně dostupných na trhu, i těch, které vznikly výsledkem výzkumných projektů, ale nepřešly do fáze komerčního využití. Po převážně rešeršních kapitolách následuje v páté kapitole popis praktického výstupu práce, konstrukčního návrhu suchého elektrostatického odlučovače. Návrh odlučovače je vytvořený na základě matematického modelu odlučovacího zařízení. Ten byl sestaven a předběžně validován srovnáním výkonových parametrů komerčních odlučovačů Ökotube a Zumikron uváděnými výrobcí s hodnotami predikovanými modelem. Finální konfigurace elektrostatického odlučovače a jeho konstrukční návrh byl zvolen s pomocí modelování znázorněných scénářů, které umožnily porovnání několika možných geometrických konfigurací odlučovače a srovnání jejich odpovídajících výkonových parametrů. Návrh je doplněn o 3D model vytvořený v prostředí Inventor.

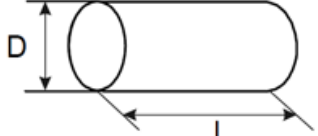
## 1. BIOMASA

Biomasa je veškerá hmota organického původu. Při jejím spalení je do ovzduší uvolněno zhruba stejné množství oxidu uhličitého, jaké bylo v živém organismu fotosyntézou akumulováno během růstu. I proto je biomasa akceptována jako uhlíkově neutrální obnovitelný zdroj energie. Rozlišujeme biomasu rostlinného a živočišného původu. V souvislosti s kotli malých výkonů se lze převážně potkat s biomasou z dřevin (dendromasa), popřípadě stébelnin (fytomasa) [3].

Biomasa se svým stářím, a tedy i složením, značně liší od ostatních tuhých paliv fosilního původu. To, co je především jiné, jsou poměry vody, hořlaviny a popeloviny v palivu, dále pak mechanické vlastnosti, jako jsou například charakteristické teploty. Nezřídka se však tyto údaje liší napříč biopalivy, a tak je třeba brát v potaz faktory, jako je stáří, původ nebo způsob zpracování. Spalování kusového dřeva s ručním přikládáním tak bude probíhat jinak a vykazovat jiné hodnoty měření než automatizované spalování pelet. Spalování dřevních pelet se bude naopak lišit od spalování pelet rostlinného původu (agropelet). V prováděných výpočtech uváděných dále v práci jsou jako palivo pelety uvažovány [3].

### 1.1 Pelety

Pelety je souhrnný název pro materiál válcového tvaru o normovaných rozměrech a způsobech výroby. V rámci této práce budou uvažovány pelety z biomasy pro energetické využití. Pro potřeby spalování je výhoda homogenizace paliva, tedy dosažení skoro stejné kvality napříč zásobníkem (stejná hustota paliva, vlhkost, velikost a tvar). Výroba pelet probíhá kompresí malých částí (piliny, odštěpky dřeva atd.) za vysokého tlaku do podoby malých válečků dle normy. Jako příklady biologického materiálu vhodného k peletování jsou dřevní materiály, rašelina, fytomasa (rostliny) nebo bioodpady. Pro všechny materiály se dodržují výrobní normy, i z toho důvodu, že odbytištěm jsou zpravidla zařízení uzpůsobené ke kombinování jednotlivých druhů. Dle Evropských standardů jsou pelety kvalitativně rozdělovány do tříd A1, A2 a B. Kvalitativně nejvhodnější jsou pro spalování v domácnostech pelety třídy A1, ale předpokládá se čím dál častější adaptace (z důvodu většího obsahu popelovin) zařízení i na pelety třídy A2. Normy Evropské (EN) jsou postupem času nahrazovány normami ISO (International Organization for Standardization). Na Obr. 1 je vidět ukázka z normy popisující tvar [4].

Průměr válečku – D, Délka – L	mm	D06 ± 1.0 3.15 ≤ L ≤ 40
		D08 ± 1.0 3.15 ≤ L ≤ 40

*Obr. 1 Příklad normy o tvaru peletky z EN 14961. Převzato z [4].*

## 1.2 Charakteristické vlastnosti a prvkové složení pelet dle normy EN 14961-2

Požadovaná výhřevnost se, dle již zmíněné evropské normy pohybuje v rozmezí 16–19 MJ/kg (pro pelety A1 od 16,5 MJ/kg). Normy stanovují i přibližné prvkové složení paliva pro získání potřebné certifikace, viz Tab. 1 a Tab. 2 [4].

*Tab. 1 Porovnání poměrových obsahů uhlíku, vodíku a kyslíku v palivu (konkrétně odshora u dřevních pelet, rašeliny a stébelnin) [4].*

Druh paliva	C	H	O
	hm. %	hm. %	hm. %
Dřevěná štěpka (smrk, buk, topol, vrba)	47.1–51.6	6.1–6.3	38.0–45.2
Kůra (jehličnany)	48.8–52.5	4.6–6.1	38.7–42.4
Sláma (žito, pšenice)	43.2–48.1	5.0–6.0	36.0–48.2

Poměr prchavé hořlaviny se v dřevních peletách (které budou v práci uvažovány jako palivo) pohybuje mezi 70 a 86 hm. %. Pro nejvyšší A1 třídu, tedy vhodnou pro lokální vytápění je pak stanoveno maximum popeloviny na 0,7 % hmotnosti paliva [4].

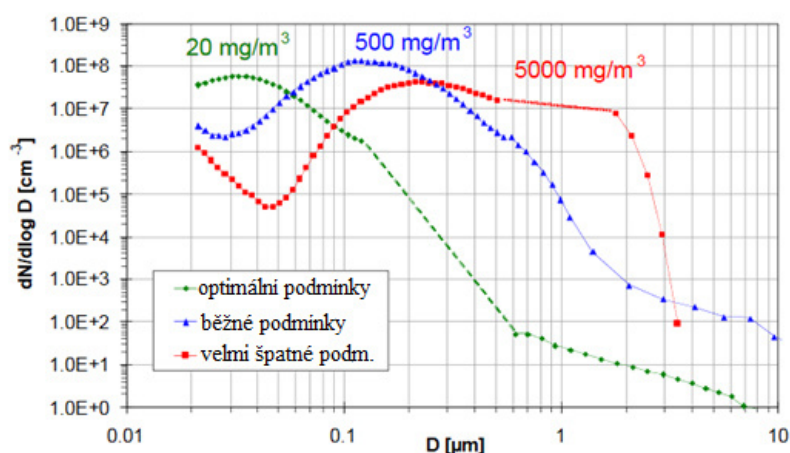
*Tab. 2 Přípustná hmotnost dusíku, síry a chloru na 1 kg paliva [4].*

Prvek	Jednotka	Dřevo	Kůra	Sláma
		(smrk)	(smrk)	(pšenice)
N	mg/kg	900–1 700	1 000–5 000	3 000–5 000
S	mg/kg	70–1 000	100–2 000	500–1 100
Cl	mg/kg	50–60	100–370	1 000–7 000

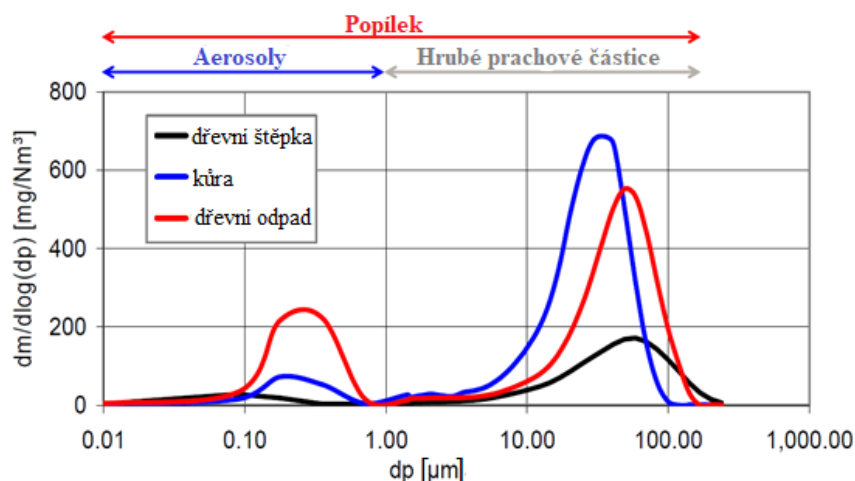
Vlhkost materiálu těsně před zpracováním do podoby pelet by se měla pohybovat mezi 8 a 12 hm. %. Dle EN 14961-2 by pak obsah vody neměl přesahovat 10 hm. %. S přihlédnutím k výše zmíněným informacím by se měla výsledná hustota dřevních pelet pohybovat v rozmezí 550-700 kg/m<sup>3</sup>.

## 2. Tuhé znečišťující látky (TZL)

Přesto, že biomasu považujeme za uhlíkově neutrální zdroj, nejedná se o zdroj bezemisní. Jedním z druhů nežádoucích emisí jsou i tuhé znečišťující látky (dále jen TZL). TZL jsou částice o různé velikosti, které se ze svého zdroje vzniku dostanou do ovzduší a jsou schopné transportu na velké vzdálenosti. Na jejich vznik mají vliv podmínky spalování (viz Obr. 2), druh paliva (Obr. 3) i výběr spalovacího zařízení. Optimalizací spalování nebo pečlivým výběrem paliva, lze vznik TZL primárně redukovat. V opačném případě lze emisi TZL snížit odlučováním částic ze spalin. Částice jsou specifické svou velikostí a tvarem, což má na celkovou účinnost odlučovacího zařízení stěžejní vliv. Na velikosti částice rovněž závisí to, za jak dlouho se budou pohybovat ve vzduchu. Čím je částice menší, tím déle trvá její usazení na zemi nebo jiném povrchu [5].



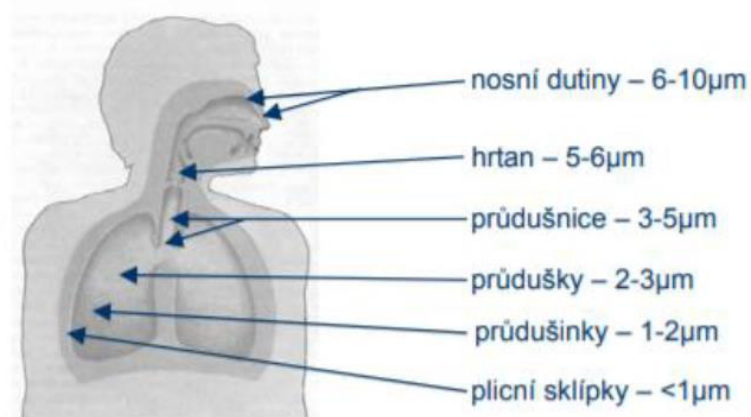
*Obr. 2 Vliv koncentrace prachových částic o různých velikostech v závislosti na podmínkách spalování. Převzato z [6].*



Obr. 3 Množství prachových částic o různých velikostech v závislosti na výběru paliva. Pře-  
vzato z [7].

## 2.1 Vliv TZL na člověka

Výzkumy z posledních let ukazují jasný vliv TZL na lidské zdraví a chod lidského organismu (Obr. 4). Mohou být iniciátorem nebo přítěžujícím faktorem u spousty respiračních, kardi-  
ovaskulárních a dalších onemocnění. Směrnice světové zdravotní organizace (WHO) se zmi-  
ňuje o  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  jako hranici kvality ovzduší. Mezinárodní agentura pro výzkum rakoviny  
(IARC, součást WHO) dokonce částice TZL označuje jako karcinogenní látky prvního stupně.  
Elektrostatickým odlučováním lze za optimálních podmínek odloučit až 95 % těchto částic  
ze spalín [8; 1].

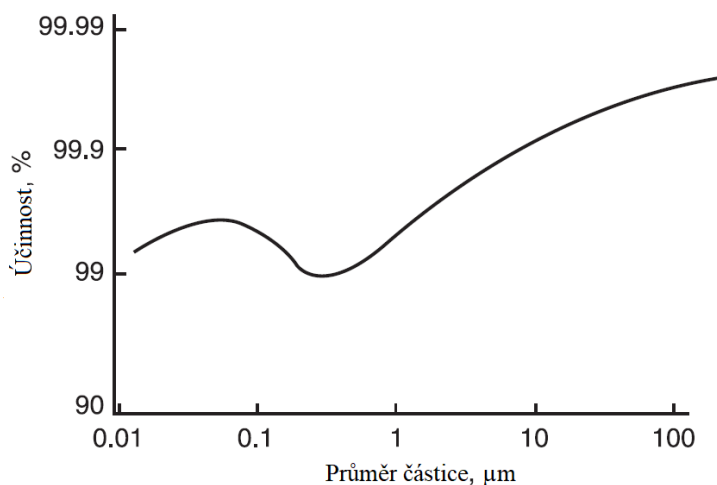


Obr. 4 Schopnost pronikání částic do lidského organismu v závislosti  
na jejich velikosti. Pře-  
vzato z [9].

## 2.2 Velikost a tvar částic

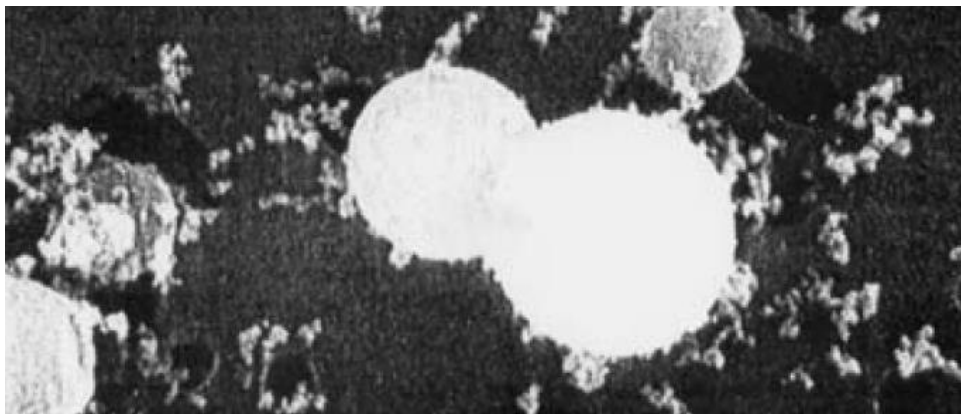
Dle velikosti se částice většinou dělí na PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub> a PM<sub>0.1</sub>. Zkratka pochází z anglického „Particular matter“ a index vyjadřuje maximální velikost částice v mikrometrech, která do dané skupiny ještě spadá. Spalováním dřevních paliv pak ve srovnání s fosilními produkuje částice menší (až 90 % spadá do skupiny PM<sub>2,5</sub>). Menší částice mají větší schopnost se shlukovat, což je kladně hodnoceno pro účinnost odlučovacího zařízení. Snáze se pak zachytí na elektrodách nebo filtrech [9; 10]. Elektrostaticky lze odlučovat částice už od 0,01  $\mu\text{m}$  až po zhruba 100  $\mu\text{m}$ . Frakční odlučivost částic není konstantní (viz Obr. 5) [11].

V grafu na Obr. 5 je viditelný pokles účinnosti odlučování u frakcí o velikosti kolem 0,5  $\mu\text{m}$ . To je způsobeno změnou nabíjení částic o těchto velikostech, kdy nabíjení způsobeno srážením (difuzí) přechází u částic o velikosti asi 1  $\mu\text{m}$  v indukční předávání náboje (nabíjení polarizací). Při větším výskytu téhle frakce ve spalínách je řešením navýšit obsah ploch sběrných elektrod pro zachování vysoké odlučivosti [11].



*Obr. 5 Závislost účinnosti odlučování na velikosti částic. Převzato z [11].*

Také tvarem se TZL mohou lišit a svým způsobem ovlivňovat vznik koronového výboje. Mohou se vyskytovat zrnité částice popeloviny nebo přimíslených materiálů (v palivu, materiál spalínovodu), které po průchodu vysokými teplotami mohou dosáhnout kulových tvarů, tak i částice dýmu, které ve spalínách kondenzují za poklesu teploty (viz Obr. 6). Tvar částic se rovněž může podílet na samotném designu zařízení. Teplota je jeden z hlavních faktorů ovlivňující jejich tvar [11].



*Obr. 6 Mikroskopická fotografie spalín ukazující přítomnost částic v podobě zrn i dýmu. Převzato z [11].*

### 2.3 Elektrický odpor částic

Elektrický odpor částic usazeného materiálu má hlavní vliv na účinnost elektrostatického odlučovače. U odporů větších než  $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$  se vyskytuje jev zvaný zpětná (reverzní) ionizace, která ubírá ze stávající účinnosti odlučování. Z důvodu vzrůstajícího el. odporu zachycené vrstvy částic se nově zachycené částice jen stěží zbavují svého náboje. To může v nejhorším případě vyvrcholit stavem, kdy dojde k emitování pozitivních iontů z povrchu usazené vrstvy částic. Částice nejenže neutralizují negativní náboj částic blížících se k usazovací elektrodě, ale mění samotné elektrické pole mezi elektrodami [11].

### 2.4 Relativní permitivita

Jedna z konstant popisujících vlastnosti částice je relativní permitivita  $\epsilon_r$ , někdy nazývána jako dielektrická konstanta. Tato materiálová konstanta vyjadřuje schopnost polarizace částice (materiálu) při jejím vystavení se elektrickému poli. Relativní proto, že se jedná o poměr absolutní permitivity materiálu částice s permitivitou vakua ( $\epsilon_0$ ). Relativní permitivita je tedy bezrozměrná.

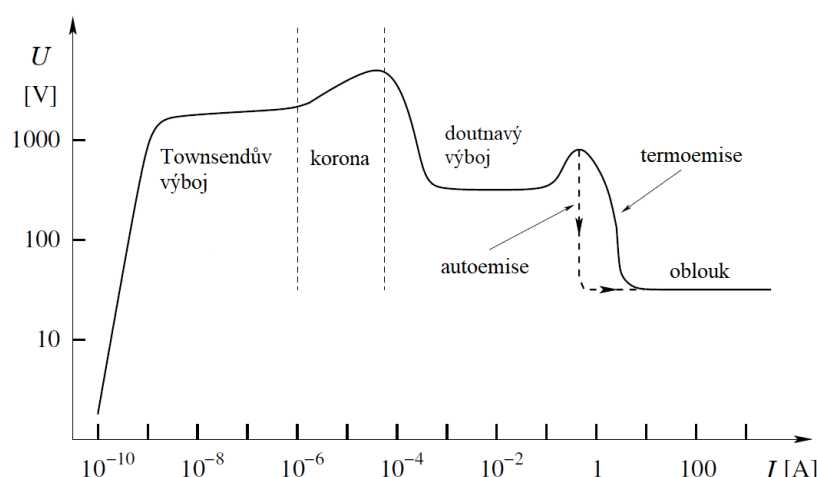


### 3. ELEKTROSTATICKÉ ODLUČOVÁNÍ ČÁSTIC

Elektrostatické odlučování částic je proces zbavování se TZL ze spalín (nebo vzduchu) s využitím znalosti fyziky plazmatu. Nástrojem je elektrostatický odlučovač částic, který je schopen zachytávat elektricky nabitě částice díky silám způsobených přítomností elektrického pole mezi elektrodami. Elektrostatický odlučovací proces lze rozdělit postupně na generování volných nosičů elektrického náboje (elektronů), nabíjení prachových částic, odloučení částic z proudu spalín, jejich nahromadění a odstranění. Proces závisí na velkém množství veličin jako jsou chemické složení spalín, teplota, tlak, průtok spalín, viskozita a mnoho dalších [11].

#### 3.1 Elektrický výboj v plynech

Po dosažení průrazu plynu se mezi elektrodami objeví výboj. Ten závisí kromě výše zmíněných i na geometrii elektrod a vlastností zdroje napětí. Výboj může existovat díky toku elektrického proudu prostředím, čímž se do výboje dodává energie. Po přerušení elektrického proudu výboje zanikají. V závislosti na přivedeném napětí a proudu rozlišujeme několik druhů výbojů. (viz Obr. 7) [12].



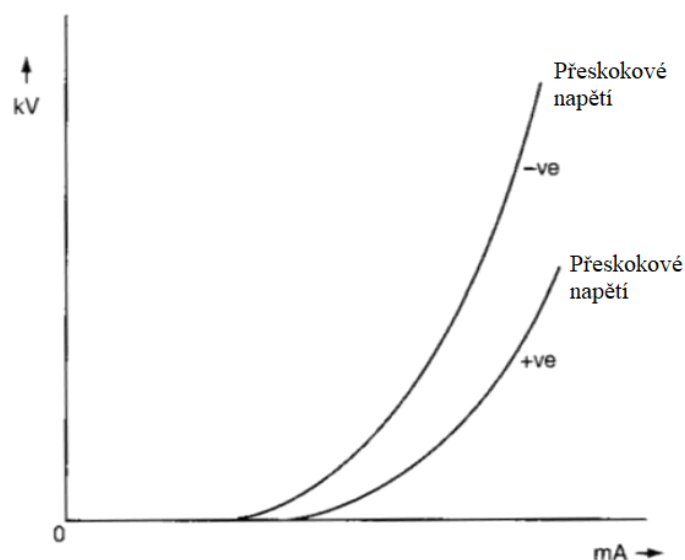
*Obr. 7 Druhy elektrických výbojů v závislosti na elektrickém napětí a proudu. Převzato z [12].*

Doutnavý výboj vznikne zpravidla při vyšších tlacích (kolem 10 kPa). Při atmosférickém tlaku je udržitelný jen při dostatečně malých proudech, aby nedocházelo k přehřívání elektrod. V opačném případě by přešel do výboje obloukového. Proto je obvykle tento typ výboje možné najít ve skleněných vakuových výbojkách se zatavenými přívody k elektrodám a o napětí jen ve stovkách voltů s proudem pohybujícím se v desítkách mA.

Obloukový výboj hoří od vakua po vysoké tlaky a od elektrického proudu 1 A. Napětí je ve srovnání s doutnavým a koronovým výbojem řádově menší, a to jen v desítkách voltů. Při zvyšování tlaku se objevuje velký gradient teploty nabitých částic a plynu. Termoemise se však dá uplatňovat jen u těžko tavitelných kovů (např. wolframu, tantalu, uhlíku). V některých aplikacích je nutné udržovat obloukový výboj při menších proudech, než je hodnota potřebná na zabezpečení termoemise z nabíjecí elektrody ( $<0,2$  A) [12]. Vzhledem k elektrostatickému odlučování částic je ale nejdůležitější výbojem koronový výboj, který bude rozebrán v následujících podkapitolách.

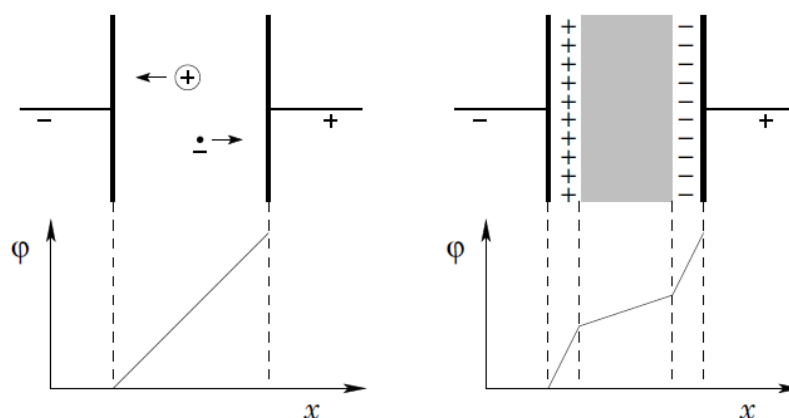
### **3.2 Fyzikální princip elektrostatického odlučování a koronový výboj**

Jak již bylo zmíněno výše, elektrické síly, vedoucí k odloučení, mohou na částici působit v důsledku přítomnosti homogenního elektrického pole ( $E$ ). To vzniká mezi kladnou a zápornou elektrodou. Pokud do takového pole vložíme částici o náboji ( $Q_p$ ), začne na částici působit elektrostatická síla, která vznikne jejich součinem ( $F_e = E \cdot Q_p$ ). Nabíjecí elektroda (většinou záporná) plní funkci vysokonapěťového zdroje připojeného na stejnosměrný zdroj napájení. Uzemněná elektroda usazovací (kladná) poté slouží k zachytu nabitých částic, které prostorem prochází. Uspořádání záporné nabíjecí elektrody a kladné usazovací se i přes určité nevýhody používá z toho důvodu, že je možné docílit koronového výboje za nižšího kritického (počátečního) napětí (viz Obr. 8) [11; 12].



*Obr. 8 Porovnání nabíjecí charakteristiky při negativní a pozitivní ionizaci, dle uspořádání elektrod. Převzato z [11].*

Aby však mohl probíhat samotný proces odlučování, musí prvně dojít k nabití neutrálních částic plynu (spalin s TZL částicemi) procházejícího elektrickým polem, ionizaci (v našem případě záporné). K ionizaci může docházet dvěma způsoby, difuzí a polarizací. U difuze se záporný náboj předává srážením emitovaných záporných iontů (aniontů) s částicemi, čímž dochází k předání záporného náboje. Když se částice blíží k bodu elektrického nasycení z důvodu srážek, začíná se pohybovat směrem k zachytné elektrodě. Jelikož pohyb aniontů je řízen zákony Brownova pohybu, nezáleží příliš na intenzitě elektrického pole [11]. Při polarizaci ano. Za působení elektrického pole migrují kladně nabitě částice k záporné elektrodě a naopak. U nabíjecí elektrody se tak objeví přebytek kladného náboje a u sběrací přebytek náboje záporného. Dojde k polarizaci. Vznikne tak pole s opačným nábojem, než je původní a prostor nelze jednoznačně určit. V ten moment se z ionizovaného plynu stává plazma (viz Obr. 9). To obsahuje volné elektrony a je tedy elektricky vodivé. V okolí částic (větších než  $1\mu\text{m}$ ) pak dochází vlivem polarizace ke zkreslení elektrického pole. Zkreslující vliv a přivádění iontů je tím větší, čím větší je velikost částice. Velká většina částic získá záporný náboj nabíjecí elektrody, a tak migrují k mnohonásobně větší kladné sběrací elektrodě [13].



Obr. 9 Vliv koncentrace nabitých částic na průběh elektrostatického potenciálu pole.  
Převzato z [12].

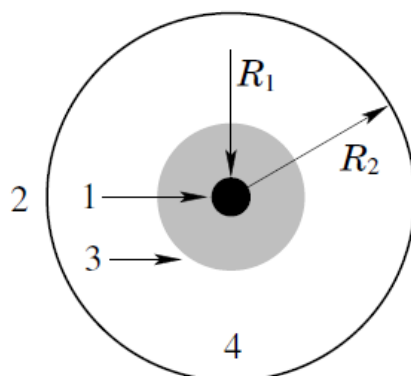
Ionizace částic vlivem difuze a polarizace probíhají současně na všech druzích (velikostech) částic, nicméně difuze je dominantním způsobem nabíjení menších částic a naopak (viz Obr. 5). Pro vznik prostorového náboje (iontů) je v odlučovači proto stěžejní jev zvaný „koronový výboj“, zkráceně „korona“.

Koronový výboj může existovat pouze v nehomogenním elektrickém poli. V homogenním poli je velice nestabilní a rychle přechází do jiné formy výboje. Nehomogenní pole vzniká, pokud má jedna z elektrod dostatečně malý poloměr křivosti. Při takto zvolené elektrodě připojené na zdroj elektrického napětí, se mohou vyskytovat lokální průrazy prostředím ještě před tím, než je přivedeno dostatečně vysoké elektrické napětí pro průraz mezi elektrodami. Takovou elektrodu nazýváme elektrodou nabíjecí a v praxi se jedná například o tenký drát, někdy dokonce drát žiletkový nebo jinak upravený pro ulehčení vzniku korony. Kolem nabíjecí elektrody vzniká silné elektrické pole, tzv. ionizační (koronující) vrstva s elektronovými lavinami<sup>1</sup>. V této úzké vrstvě je korona udržována. Ta je dokonce viditelná, jakožto modře světélkující<sup>2</sup> obal nabíjecí elektrody. Zbytek prostoru pak tvoří vnější vrstva náboje. Názorně je vše

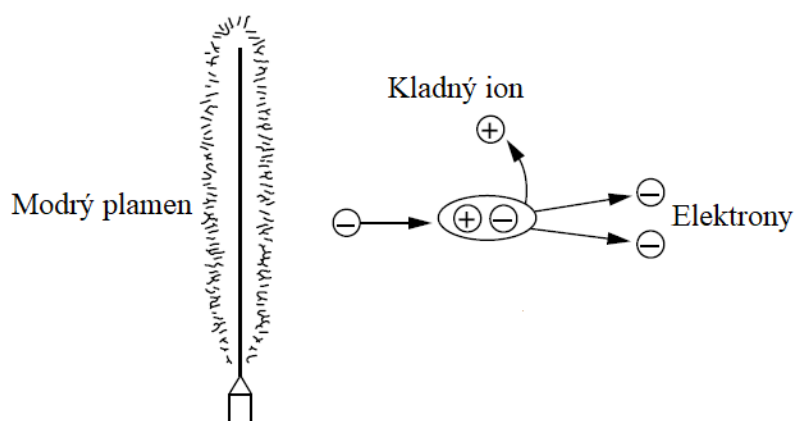
<sup>1</sup> V přítomnosti elektrického pole jsou během ionizace plynu elektrony urychlovány a oddělovány od kladných iontů. Po krátké době dojde ke srážce elektronu s neutrální molekulou plynu a dojde k uvolnění dalšího elektronu, pokud uvolněný elektron disponuje dostatečnou kinetickou energií, elektronová lavina pokračuje (viz Obr. 11). Vzniká tedy jen v oblasti dostatečně silného elektrického pole [14].

<sup>2</sup> Koronový výboj je doprovázen praskavým zvukem a charakteristickým slabým modravým zářením, které vzniká emisí fotonů z vysoce aktivovaných molekul a iontů [14].

popsáno v Obr. 10. Se zvyšováním napětí mezi elektrodami se pak vnější vrstva zmenšuje. Podle polarity koronující elektrody můžeme korunu dělit na kladnou a zápornou [12; 14].



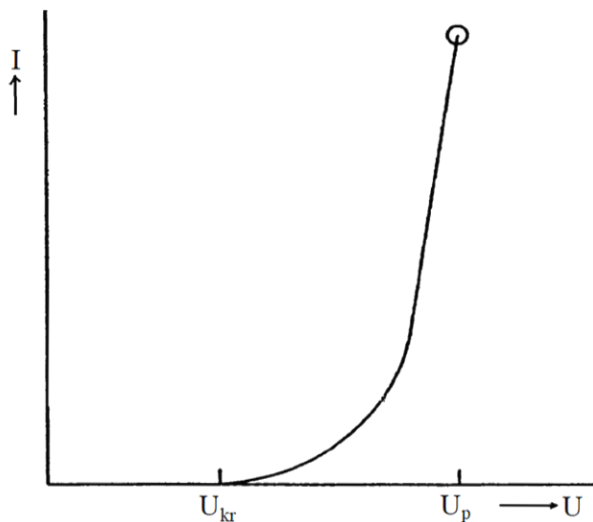
*Obr. 10 Koronový výboj v uspořádání „trubka – drát“. Písmeny  $R_1$  a  $R_2$  jsou označeny poloměry nabíjecí (drátové) elektrody (1) a méně zakřivené elektrody sběrné (2). 3 – ionizační vrstva, 4 – vnější oblast výboje (nedochází k ionizaci). Převzato z [12].*



*Obr. 11 Vznik korony. Převzato z [15].*

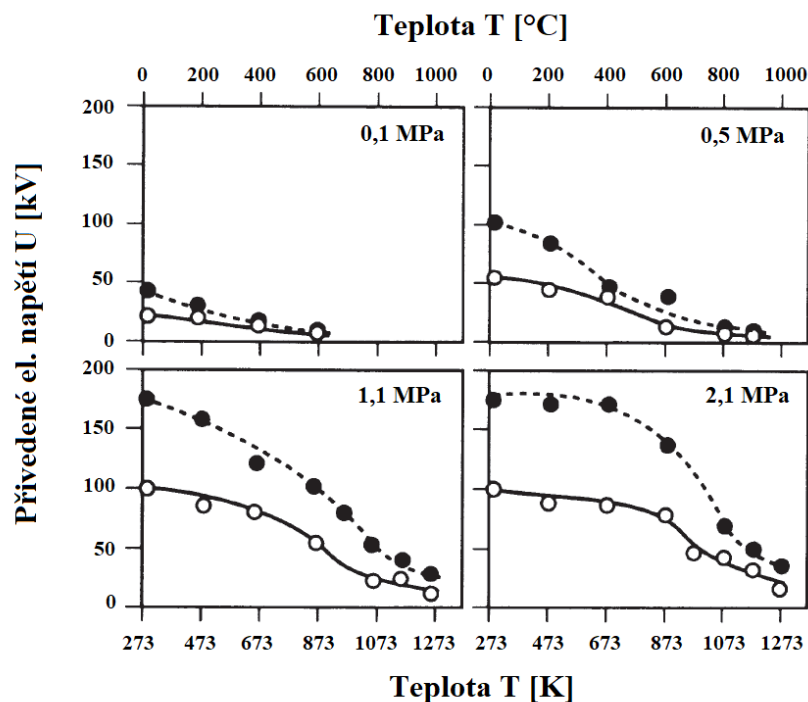
Nejnižší napětí, při kterém dojde k uvolnění dostatečného množství nosičů elektrického proudu a může tak dojít ke vzniku korony, se nazývá počáteční kritické napětí. Při jeho zvyšování začne mezi elektrodami proudit kondukční proud tvořený ionty, vznikajícími v okolí drátu ionizací plynu elektrony. Ionty opačné polarity, než je elektroda nabíjecí (drát), k ní migrují a v její blízkosti se polarizují. Ionty stejné polarity jsou naopak vytlačovány elektrickým polem směrem k elektrodě usazovací (Obr. 11). Ionty obojí polarity se tak mohou společně vyskytovat jen

v úzké ionizační zóně. Korona zaniká, když napětí překročí hranici napětí jiskrového a korona přechází v doutnavý nebo obloukový výboj (viz voltampérová charakteristika na Obr. 12). Poté už prostorem neteče trvalý proud [13; 12].



*Obr. 12 Voltampérová charakteristika elektrostatického odlučovače. Proud mezi elektrodami prochází, pokud se hodnota napětí pohybuje mezi napětím kritickým  $U_{kr}$  a hranicí přeskokového napětí  $U_p$ . Převzato z [16].*

Při pokojové teplotě a stálém tlaku 100 kPa je mezi počátečním koronovým napětím a napětím jiskrovým přibližně 25 kV. S narůstajícími teplotami má tento rozdíl tendenci se zmenšovat (viz Obr. 13). Spolehlivé hodnoty jsou však především určovány experimentálně [14].



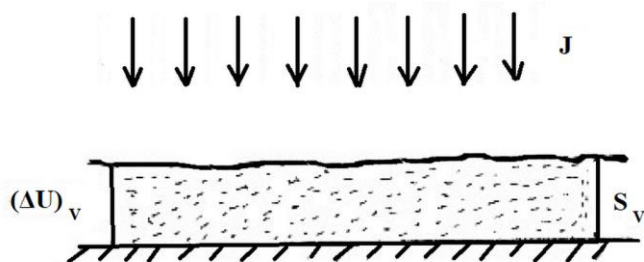
*Obr. 13 Porovnání rozdílů koronového počátečního (○) a jiskrového napětí (●) při různých teplotách a tlacích u trubkového odlučovače s poměrem poloměrů elektrod  $R/r = 62,5$ . Převzato z [14].*

Dle [2] existuje jasná závislost citlivosti koronového výboje a podmínek jeho vzniku vzhledem k teplotě spalin. Ukázalo se, že za konstantního napětí se při zvýšení teploty zvyšuje i napětí procházející polem a snižuje hranice průrazného napětí. Při zvyšování teploty spalin je tedy pro stabilizování korony doporučováno napětí na elektrodách snižovat.

S koronovým výbojem se v energetice mimo technologie určené pro elektrostatické odlučování lze setkat u vedení vysokého napětí. Tam se objevuje jako nežádoucí jev a působí ztráty při přenosu elektrické energie. Nabíjecími elektrodami jsou v takovém případě vodiče vysokého vedení a druhou elektrodou je okolní půda, nad kterou jsou vodiče nataženy [12].

### 3.2.1 Elektrický odpor usazené vrstvy

Při růstu vrstvy usazených částic, viz Obr. 14, se pozvolna mění účinnost odlučování (viz Tab. 26) a provozní parametry odlučovače. Většinou tedy k horšímu. I proto je třeba se vrstvy usazenin pravidelně zbavovat a čistit usazovací elektrodu. To lze provádět oklepáváním, ostřikem vodou, manuální údržbou usazovací elektrody, případně jinými způsoby. Problémem je zvyšující se elektrický odpor vrstvy částic. Konkrétně jej označujeme jako měrný odpor vrstvy částic  $\rho_v$  [17].



Obr. 14 Měrný odpor vrstvy částic. Převzato z [17].

Platí vztah [17]:

$$\rho_v = \frac{(\Delta U)_v}{j \cdot s_v} \quad [\Omega \cdot \text{m}] \quad (3.1)$$

$s_v$  – tloušťka vrstvy částic,  $(\Delta U)_v$  – spád napětí na vrstvě částic;  $j$  – hustota el. proudu

Zvětšováním vrstvy prachu se zvětšuje rozdíl potenciálů mezi povrchem usazené vrstvy a elektrodou. To je způsobeno především zhoršujícími se podmínkami pro předávání náboje nově zachycených elektronů na usazovací elektrodě. Celkové napětí přivedené odlučovači bude sníženo právě o úbytky napětí na elektrodách. Aby i přesto mohl probíhat koronový výboj, napětí i po odečtení úbytků musí přesahovat hranici napětí kritického. Pokud je prach usazený na elektrodě suchý a málo vodivý, úbytek napětí na elektrodě může být velký. Plyn, uzavřený ve vrstvě usazenin, je tak elektricky namáhán a může dojít k jeho nárazové ionizaci a vzniku tzv. „zpětné korony“.

### 3.3 Vznik ozónu

Ozón je nechtěný vedlejší produkt elektrického odlučování, jehož produkce se objevuje simultánně s koronovým výbojem. Při návrhu elektrostatického odlučovače částic v experimentální části práce se jím zabývat nebudeme, nicméně je snaha produkci tohoto vysoce reaktivního plynu omezovat. Z veřejně dostupných zdrojů je patrné, že množství vyprodukovaného ozónu přímo souvisí s tepelným výkonem nabíjecí elektrody (drátu). Ozón vzniká v okolí nabíjecího drátu v chemicky aktivní ionizační zóně obsahující volné radikály (vysoce reaktivní částice s nepárovými elektrony). Čím většího tepelného výkonu bude elektroda dosahovat, tím méně ozónu bude v její blízkosti vznikat. S rostoucím tepelným výkonem elektrody se však mění

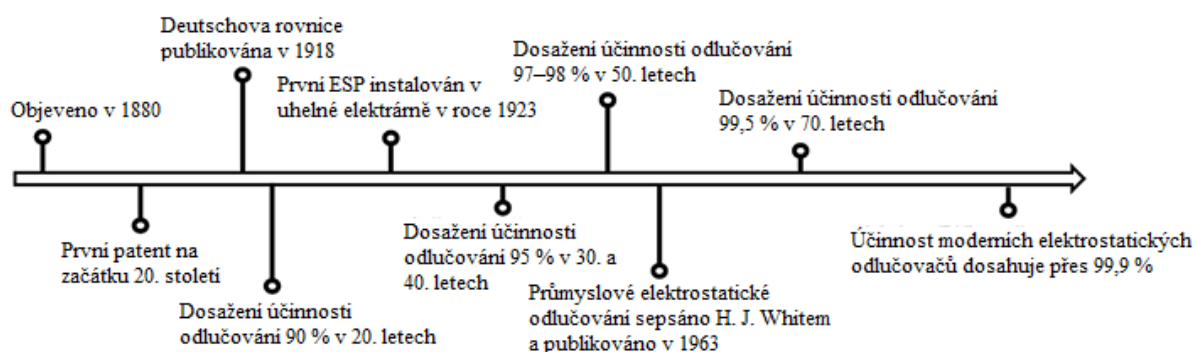


charakteristické veličiny korony, jako je kritické iniciační elektrické napětí a také elektrický proud. Vznik ozónu lze ovlivnit konstrukčně, například výběrem materiálu nabíjecí elektrody nebo optimalizací geometrie elektrod [18].

Ideální by bylo vést již vyčištěné spaliny do komína znova přes spalovací komoru kotle, kde by se zvýšila jejich teplota a došlo k redukci ozónu jinak než úpravami elektrody. A to s mnohem větším efektem a bez zásahu do odlučovacího mechanismu. Pokud bychom porovnali vznik ozónu při působení kladné a záporné korony (při zachování geometrie a při použití stejného konstrukčního materiálu drátu, objemového průtoku vzdušiny, elektrického proudu a tepelného výkonu drátu), došli bychom k závěru, že za působení kladné korony vzniká ozónu mnohem méně. V aplikacích pro čištění spalin se přesto používá hlavně korona záporná, a to z důvodu nižšího napětí, které je potřebné pro vznik korony [18].

### 3.4 Odlučovače částic

Elektrostatické odlučovače nejsou zdaleka novou, nicméně pořád se zdokonalující technologií. Jak technologicky, tak i z pohledu možného využití a aplikací. Stručný vývoj elektrostatického odlučování je vyobrazen na časové ose na Obr. 15.

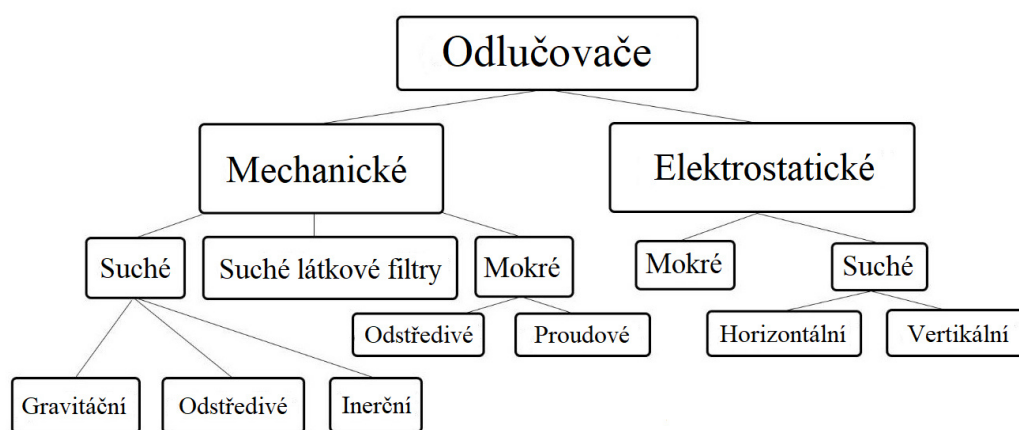


*Obr. 15 Schéma zobrazující historii elektrostatického odlučování, dle dosažené účinnosti.*

*Převzato z [19].*

Odlučovače částic lze obecně rozdělit na mechanické a elektrostatické, viz Obr. 16. Mezi mechanické se považují například filtry a odstředivé odlučovače, cyklony. Cyklonové odlučovače jsou založeny na principu odloučení částic odstředěním a jsou schopny dosahovat účinností

až 70 % pro frakce o velikosti 5  $\mu\text{m}$ . Při zmenšujících se částicích odlučivost rapidně klesá. Do zařízení cylindrického tvaru vstupuje znečištěný plyn nebo spaliny tangenciálně pro dosažení rotace. Takový pohyb způsobí, že se částice odstředí ke stěně odlučovače a končí ve sběračích. Mezi mechanické způsoby odlučování také patří filtry. Látkový filtr je konstrukčně velmi jednoduchý a zároveň účinný, přestože se při odlučování částic vzniklých spalováním biomasy nepoužívá příliš často. Odlučivost bývá téměř nezávislá na velikosti částic. Nevýhodou však bývá vlhkost čistěného plynu, což může rapidně snížit účinnost odlučovacího procesu [20].



Obr. 16 Orientační rozdělení odlučovacích technologií. Převzato z [9].

### 3.4.1 Elektrostatické odlučovače částic

Elektrostatické odlučovače, jak napovídá název, jsou uzpůsobeny k odlučování částic pomocí sil způsobených elektrickým polem, jak bylo již popsáno výše. Prvně byly nasazeny do provozů již počátkem 20. století a postupem času se staly nejpoužívanější technologií pro čištění kouřových a odpadních plynů v elektrárnách, tedy pro čištění plynů s většími objemovými průtoky. Využívány jsou od největších energetických provozů po malé instalace při lokálních topeništích, čímž se zabývá i tato práce [19].

Elektrostatické odlučovače se konstrukčně dělí na trubkové a komorové, dále pak na horizontální a vertikální. Komorový odlučovač je vývojově až druhá generace a je zpravidla používán ve velkých energetických provozech, kde je potřeba vyčistit velké množství plynu. Nejčastěji je instalován v horizontálním provedení. Sestává se z několika sekcí instalovaných do jedné skříně. Elektricky odizolované nabíjecí elektrody jsou umístěny na závěsných rámech.

Bývají většinou konstruovány v konfiguraci deska–drát, kde plyn proudí mezi paralelně zavěšenými deskami, mezi kterými jsou zavěšeny ve vyměřených rozstupech nabíjecí drátové elektrody. Pro zařízení s menšími průtoky (do  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ ) lze použít i konfiguraci deska–deska, kde však samovolně korona nevzniká a je třeba začlenit další konstrukční řešení, jako jehly vystupující z nabíjecí desky a další [21].

Trubkový odlučovač je vývojově starší a jednodušší typ. Slouží k odlučování menšího průtoku plynu, je tak vhodnější i pro lokální spalovací zařízení o menších výkonech. Nabíjecí elektroda se na rozdíl od té sběrací výrazně lišit nemusí. Stejný důraz musí být kladen i zde na její elektrickou izolaci. Tvar sběrací elektrody se volí válcový nebo šestihranný, jen výjimečně čtvercového průřezu. Stejně, jako u komorového elektrostatického odlučovače, může být i trubkový odlučovač složen z několika sekcí, podle množství plynu. Každá sekce však musí být osově souměrná s nabíjecí vysokonapětovou elektrodou uprostřed, viz Obr. 17. Tato diplomová práce se v praktické části zabývá pouze tímto druhem elektrostatického odlučovače [22].



*Obr. 17 Pohled do útroby trubkového elektrostatického odlučovače. Převzato z [23].*

U odlučovačů jak mechanických, tak elektrostatických se může jednat o suché nebo mokré procesy. Suché odlučovače nevyužívají při odlučování částic nebo spíše čištění elektrod od částic kapalinu. Zachycené částice je nutné přemístit do sběracích nádob či boxů a vyčistit tak odlučovací plochy, aniž by zpětně unikly do proudu znečištěného plynu. U některých odlučo-

vačů se během čištění průtok plynu zařízením pozastavuje. U suchých metod se jedná především o mechanický oklep ploch nebo manuální čištění. U menších trubkových odlučovačů se může jednat o běžné čištění při údržbě komína kominickou štětkou. U mokrých odlučovačů je pro odlučování plynu nebo čištění elektrod použita kapalina, obvykle voda. U několika konstrukcí je volen oplach k odstranění zachycených částic. Výhodou oplachu je bezesporu jednodušeji se shlukující částice, které tak nemohou uniknout do ovzduší. To dělá z mokrého čištění vysoce efektivní způsob. Problém může nastat při kontaktu kapaliny s vysokým napětím na nabíjecí elektrodě, a tak je třeba se tomuto nebezpečí dobrým konstrukčním nebo provozním řešením vyvarovat. Je nutné se zabývat ne jenom odvedením kapaliny z oplachu, ale při větším množství i její recyklací [20].

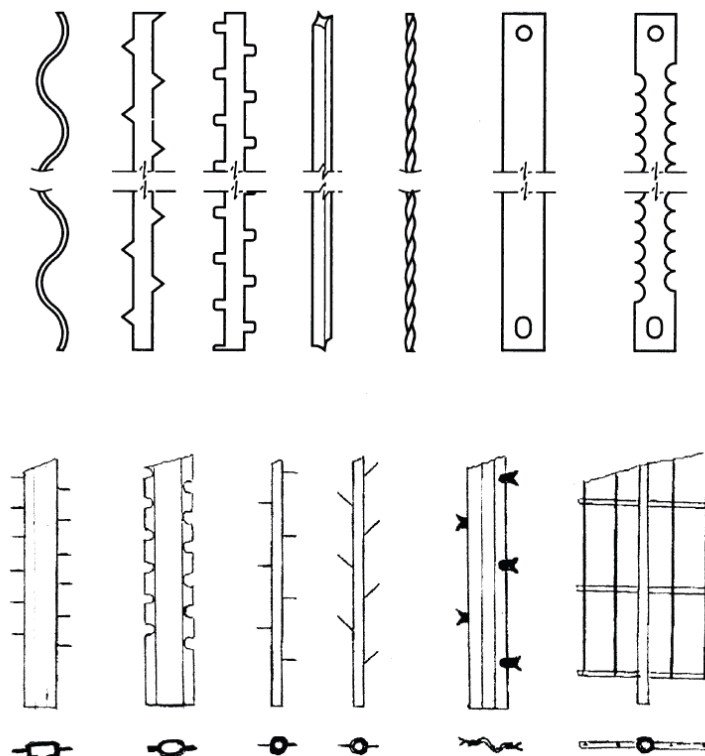
Čištění elektrod od nánosů, ať už jakýmkoliv způsobem, může být manuální, automatizované nebo polo automatizované. Automatizované čištění v daných intervalech nebo na základě různých senzorů, je nejefektivnější, ať už z pohledu ekonomického, tak vzhledem k účinnosti. Pokud se totiž odlučovač od nánosů vyčistí za chodu, provoz se stává stabilnějším. Způsob čištění má vliv i na samotný design zařízení. Do výběru materiálu a pevnostních výpočtů musí být zváženy jak síly působící při čištění od nánosů, tak i váha uvažovaných nánosů prachu. Při konstrukci hraje výrazný vliv teplota. V závislosti na teplotě spalin na vstupu do zařízení je nutno vybírat i použitý materiál. U větších zařízení pak je třeba počítat i s teplotní dilatací konstrukce. Teplota rovněž ovlivňuje životnost materiálu z pohledu působení koroze. Změny tlaku u menších trubkovitých odlučovačů jsou zanedbatelné a nemají výrazný vliv na konstrukci zařízení [11].

### **3.4.2 Elektrody a jejich konfigurace u trubkového elektrostatického odlučovače**

Jak bylo výše zmíněno, elektrostatický odlučovač se skládá ze dvou druhů elektrod: nabíjecí a sběrací. Pokud se nabíjecí i sběrací část nachází ve stejné oblasti, jedná se o tzv. „single stage“ konfiguraci. Pokud jsou však tyto sekce odděleny, mluvíme o tzv. „two stage“ konfiguraci. Konfigurace bývají navrhovány a optimalizovány pro dosažení nejvyšší možné účinnosti za současné úspory materiálů a spotřeby elektrické energie. Snahou je maximalizovat elektrický proud a elektrické pole za současné akceptovatelné hodnoty elektrického příkonu. Odlučovač by tak měl být mnohem ekonomicky méně náročný oproti spalovacímu zařízení [15; 21].

Nabíjecí elektrody jsou většinou z drátů izolovaných od uzemnění a připojených na záporný pól zdroje. Na spodních koncích jsou napínány pomocí závaží. Pro usnadnění vzniku

koronového výboje bývají dráty opatřeny žiletkami nebo jinými jehlovitými tvary snižující poloměr zakřivení (viz Obr. 18) [13].



*Obr. 18 Příklady tvarů nabíjecích elektrod. Převzato z [11].*

Na sběrací elektrodě z funkčního hlediska nesmí docházet k výboji. Proto se volí s menším poloměrem zakřivení, tedy s větším průměrem. Sběrací elektrody jsou tvořeny z válcovitých trubek, popřípadě z trubek hexagonálního, výjimečně čtvercového průřezu. Nabíjecí elektroda tvoří zároveň osu symetrie. U mokrých odlučovačů je snaha při čištění dosáhnout pravidelného vodního filmu po celém obvodu elektrody. I podle toho se volí většinou kovový materiál sběracích elektrod. Ty musí být pečlivě uchyceny, aby nedošlo k vysmeknutí nebo poruchám z důvodu teplotní dilatace materiálu nebo při čištění [13].

### **3.4.3 Napájení a izolace**

Podstatou elektrostatického odlučování je nabíjecí systém. Na nabíjecí elektrodu je přiveden stejnosměrný elektrický proud, lépe řečeno usměrněný střídavý proud získaný obvykle ze síťového připojení. Střídavý proud nebývá přímo aplikován z důvodu toho, že způsobuje změnu

smyslu elektrického pole, což by v praxi způsobilo velký pokles účinnosti. Není ani běžné, aby bylo přímo odebíráno nebo produkováno stejnosměrné napětí o několika kV [13]. Potřebné je také zajistit dobrou izolaci nabíjecí soustavy pomocí vysokonapětových izolátorů. Výběr izolátorů není snadný, jelikož budou instalovány ve značně znečištěném prostředí a provozovány při zvýšených teplotách. Při znečištění nebo navlhnutí izolátoru může dojít ke snížení izolační schopnosti, což může způsobit přeskok náboje a možný poruchový stav (zkrat) zařízení. U velkých elektrostatických odlučovačů se tak někdy využívá technologie prohřívání izolátorů, aby se jejich povrchová teplota udržela nad rosným bodem a zároveň se snižovalo pnutí způsobené nerovnoměrným prohříváním, tzv. teplotní namáhání materiálu. Zanášení izolátoru je možné snížit i vhodnými konstrukčními prvky jako např. ochranné hrdlo, které zabraňuje vstupu nečistot. Někdy izolátorům bývá přiřknuta i funkce nosná. Bývá většinou vyroben z moderních keramických materiálů, hliníkových porcelánů, hliníku nebo křemíku. Elektrická rezistivita těchto materiálů je vysoká, přesto však s rostoucí teplotou klesá. Na Obr. 19 lze vidět některé ze základních druhů izolátorů vhodných pro elektrostatické odlučovače [13; 11].



*Obr. 19 Výběr některých běžně používaných keramických izolátorů dostupných na trhu.*

*Převzato z [24].*

### **3.5 Odlučovače pro kotle malých výkonů**

Emisní požadavky a ekologičnost nových spalovacích zařízení se zpřísňují [25]. Elektrostatické odlučovače lze však považovat za možný způsob splnění daných emisních limitů. Malé elektrostatické odlučovače provozované s menšími elektrickými příkony by měly být oproti velkým průmyslovým odlučovačům nenáročné na údržbu a zároveň rentabilní i pro běžného uživatele. Jsou velikostně uzpůsobeny dané aplikaci a konstrukčně značně zjednodušeny. Můžeme se

setkat se dvěma způsoby aplikací „domovních“ odlučovacích zařízení, a to při ústí komínů, nebo vřazené mezi spalovací zařízení a komínové těleso, viz Obr. 20. Zařízení aplikované mezi kotlem a komínem bude dosahovat lepší životnosti, protože jeho konstrukce není vystavována vlivům počasí.



*Obr. 20 Dvě základní provedení malých trubkových elektrostatických odlučovačů. Model „top“ umístěný na komíně (vlevo) a „in-line“ zasazený do spalínovodu mezi spalovací zařízení a komín (vpravo). Převzato z [26].*

Aby byl malý elektrostatický odlučovač ekonomicky přijatelný, musí být nenáročný na údržbu, jednoduchý na konstrukci, levný a především účinný. Pro konstrukci je výhodou, že se napříč spalínovody výrazně nemění tlak. Spalínovod může plnit i roli sběrací elektrody, pokud je tedy z vhodného materiálu( především nerezové oceli) který by byl schopný odebrat náboj částic [27]. Údržba a čištění se liší dle jednotlivých výrobců a typů odlučovačů. U velkého množství takto dostupných produktů bývá manuální, při běžném čištění komínu a spalínových cest. Mezi existujícími elektrostatickými odlučovači jsou k vidění i automatické nebo poloautomatické systémy čištění [28]. Automatické čištění nánosů probíhá buď v pevně zadaných časových intervalech nebo v okamžicích změny doporučených provozních parametrů, detekovaných například tlakovými sensory. Vzhledem k malým tlakovým rozdílům ale musí být velice citlivé.

#### **4. PRŮZKUM TRHU S ELEKTROSTATICKÝMI ODLUČOVAČI PRO KOTLE MALÝCH VÝKONŮ**

Tato část předkládané práce se bude zabývat rešerší jak již existujících elektrostatických odlučovačů a zařízení uvedených na trh, tak experimentálních zařízení publikovaných ve vědeckých člancích, která jsou technologicky blízko k jejich komerčnímu uvedení na trh. Rešerše sestávala ze sběru informací z veřejně dostupných informačních zdrojů a jejich uspořádání. Vybrané aplikace elektrostatických odlučovačů jsou uvedeny níže v podkapitolách. Ve výpočetní části předkládané diplomové práce je následně provedeno teoretické srovnání s vlastním návrhem výpočtu při dosazení co možná nejvíce podobných a dohledatelných údajů několika zmíněných odlučovacích zařízení

Rešerši jsem provedl pro celkem 8 vybraných elektrostatických odlučovačů částic vhodných pro teplovodní kotle malých výkonů spalujících pelety, štěpku, popřípadě jiná biopaliva. Konkrétně odlučovač částic Ökotube (Lichtenštejnsko), který je na trhu již delší dobu a je ze všech uvedených, dle počtu instalací, u spotřebitelů nejoblíbenější. Dále Zumikron (Švýcarsko), Al-top (Německo) a Airjekt 1, které rovněž na trhu figurují. Mezi dalšími, které sice na trhu k dostání nejsou, ale jsou dostupné základní informace o jejich konstrukci a funkci, jsou Carola (Německo), Residential ESP (Norsko), Ruff-kat (Rakousko) a Dry ESP (Německo) od společnosti Robert Bosch [29; 28].

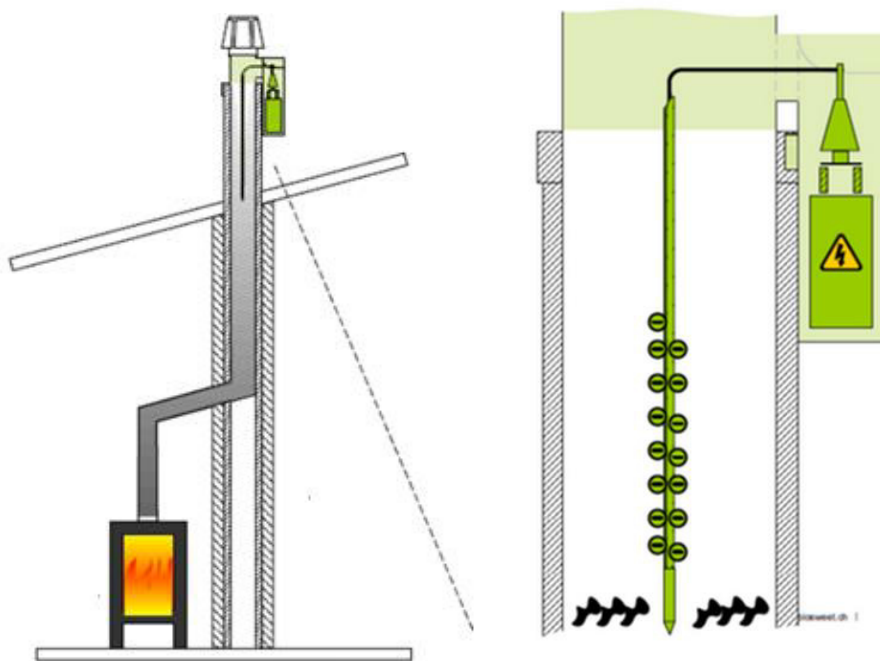


#### 4.1 Öekotube (Švýcarsko)

*Tab. 3 Základní obecné a technické údaje o elektrostatickém odlučovači částic Öekotube [28; 29; 26].*

Jméno produktu:	Öekotube
Výrobce:	Öekosolve AG
Země:	Švýcarsko
Cena:	~1000 €
Průměr sběrací elektrody:	> 130 mm
Délka odlučovače:	2 m
Napětí na elektrodě:	15–30 kV
Požadované napětí na zdroji:	230 V AC
Příkon:	20–30 W
Výkon spalovacího zařízení:	do 50 kW
Odlučivost:	65–97,5 %

První vývoj produktu Öekotube začal již v roce 2006 a uveden na trh byl o dva roky později. Dnes je na světě již několik tisíc instalací tohoto typu trubkového odlučovače. Je instalován na komín, který tím naroste zhruba o 25 cm do výšky, nebo do prostorů mezi komínem a spalovacím zařízením. Délka sběrací elektrody dosahuje délky 2 metrů, a tak je požadováno, aby i kouřovod této vertikální délky dosahoval, jelikož je do kouřovodu komína instalován (Obr. 21). Vhodný je jen pro kouřovody o průměru 130–400 mm. Nabíjecí elektroda uvnitř odlučovače je dlouhá 1,5 m o průměru 10 mm. Spaliny vstupující do odlučovače by neměly přesahovat teplotu 400 °C. Příkon při tzv. „stand-by“ módu, kdy je zařízení vypnuté, činí méně než 1 W. Odlučivost byla firmou Öekosolve testována pro kotle různých výkonů, proto je v naměřených účinnostech v Tab. 3 značný rozptyl. Pro kotle o výkonu například 0–25 kW se odlučivost pohybuje v rozmezí 70–95 %. Celková odlučivost pro dřevo při testování dle zdroje [30] dosahovala 67,5 %, pro PM1 62,3 % a pro částice v rozmezí 1–10 µm 88,6 %. Účinnost zařízení se pochopitelně snižuje se zanášením elektrod, které by měly být pravidelně čištěny, ať už během pravidelné údržby spalínovodů nebo častěji, kominickou štětkou. Komín tak musí být k údržbě a samotné instalaci dobře přístupný (Obr. 22). Cena v Tab. 3 je uvedena bez instalace. S instalací se dle dostupných údajů cena může pohybovat mezi 1600–2000 € [28; 26].



Obr. 21 Instalace elektrostatického odlučovače částic Öekotube s detailem nabíjecí části zařízení. Převzato z [26].



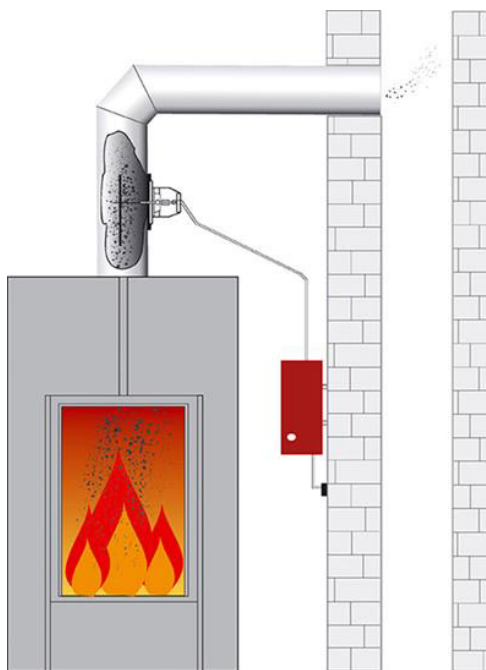
Obr. 22 Ukázka zapojeného odlučovače Öekotube s příkladem běžné údržby (vpravo). Převzato z [26].

## 4.2 Zumikron (Německo)

*Tab. 4 Základní obecné a technické údaje o elektrostatickém odlučovači částic Zumikron [29; 28].*

Jméno produktu:	Zumikron
Výrobce:	Kutzner und Weber GmbH
Země:	Německo
Cena:	~1200 €
Průměr sběrací elektrody:	>130 mm
Délka trubky za nabíjecí částí:	~ 2 m
Napětí na elektrodě:	19–22,5 kV
Požadované napětí na zdroji:	230 V AC
Příkon:	<12 W
Výkon spalovacího zařízení:	do 35 kW
Aplikace:	Kotle na pelety, štěpku
Odlučivost:	57–81 %

Trubkový elektrostatický odlučovač částic pro kotle a krbové vložky malých výkonů Zumikron je na trhu už od roku 2007. Za tu dobu byly instalovány tisíce kusů. Nabíjecí elektroda je vsazena do spalínovodu mezi spalovací zařízení a komín (viz Obr. 23). Teplota spalin by neměla přesáhnout 400 °C. Mohlo by pak dojít k nevratnému poškození nabíjecí části odlučovače. Pro menší upřesnění odlučivosti z Tab. 4 je zveřejněná i odlučivost u PM1, a to v rozmezí 20–76 %. Čištění elektrod je manuální, při běžné pravidelné údržbě spalínových cest. Za dobu, kdy jsou odlučovače Zumikron v provozu, byly zaznamenány nesčetné stížnosti na hluk [28; 29].



Obr. 23 Možné provedení zapojení elektrostatického odlučovače Zumikron. Převzato z [31].

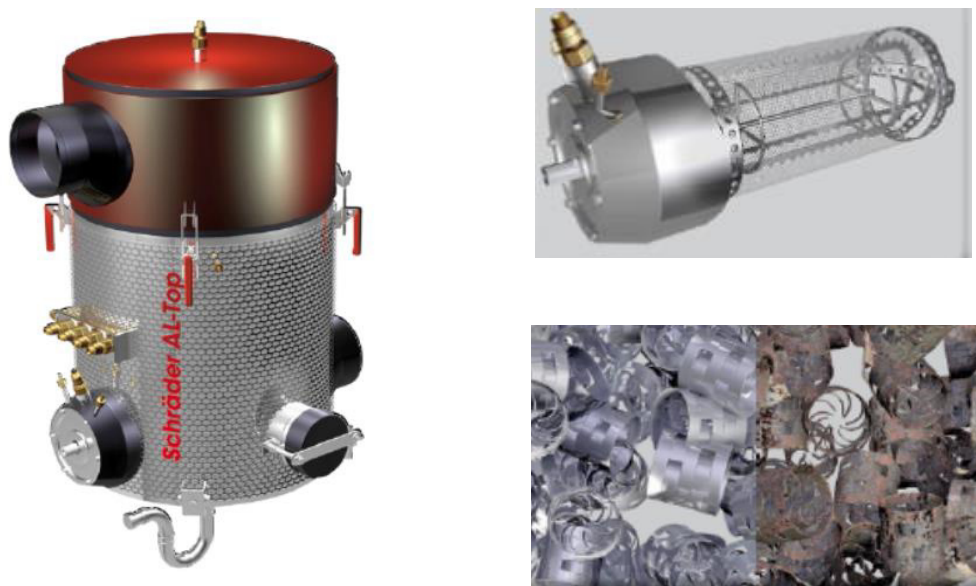
#### 4.3 Al-top (Německo)

Tab. 5 Základní obecné a technické údaje o elektrostatickém odlučovači částic Al-top [29; 28].

Jméno produktu:	Al-top
Výrobce:	Schröder Abgastechnologie
Země:	Německo
Cena:	~2000 €
Velikost odlučovače:	0,4×0,5×1 m
Výkon spalovacího zařízení:	do 50 kW
Aplikace:	Kotle na pelety a štěpku
Odlučivost:	až 82 %

Al-top od společnosti Schröder Abgastechnologie je elektrostatický odlučovač částic s kovovým filtračním lože. Po nabití (v dolní části odlučovače) jsou částice ve filtračním lože zachyceny na povrch kovových součástí (Obr. 24). Tímto technickým provedením je při zkrácení

délky sběrací části odlučovače zároveň navýšen obsah sběrací plochy. V odlučovači je citlivé tlakové čidlo, které po překročení nadefinovaných hodnot tlakového rozdílu, spustí rozstřík vody v horní části odlučovače. Tím se kovové filtrační lože vyčistí a nečistoty odplaví pryč z odlučovače [29; 28]. Při testech uváděných ve zdroji [30] byla pro dřevo naměřena celková odlučivost 71,7 %, přičemž pro částice v rozmezí 1–10  $\mu\text{m}$  78,4 % a pro frakci o velikosti PM1 84,7 %.



*Obr. 24 Elektrostatický odlučovač částic Al-top (vlevo) s nabíjecí elektrodou, která je v reálu zasunutá do odlučovače v dolní části (vpravo nahoře) a ukázka čistého a zaneseného kovového lože (vpravo dole). Převzato z [32].*

#### 4.4 Airjekt 1 (Německo)

*Tab. 6 Základní obecné a technické údaje o elektrostatickém odlučovači částic Airjekt 1 [33].*

Jméno produktu:	Airjekt 1
Výrobce:	Kutzner und Weber GmbH
Země:	Německo
Cena:	~1500 €
Průměr sběrací elektrody:	130–300 mm
Napětí na elektrodě:	do 18 kV
Požadované napětí na zdroji:	230 V AC
Příkon:	30 W
Výkon spalovacího zařízení:	do 50 kW
Aplikace:	Kotle na biomasu
Odlučivost:	50–90 %

Airjekt 1 je další, na trhu dostupný, elektrostatický odlučovač částic vhodný pro kotle na biomasu, včetně těch na pelety. Z uvedených odlučovačů patří bezesporu k těm dražším. V technických údajích lze mimo ty v tabulce najít i „stand-by“ mód, který je 2 wattů. Teplota spalin by pro dosažení předepsané spolehlivosti zařízení neměla přesáhnout 400 °C. Na prodejních stránkách firmy Kutzner + Weber je k vidění více provedení odlučovače Airjekt 1, a to co se do provedení, materiálu a možného použití týče. Na výběr jsou provedené „Keramik“, „Basic“, „Outdoor DW“ a „Outdoor Top“ (Obr. 25). První tři zmíněné jsou vhodné pro aplikaci mezi spalovací zařízení (kotel) a komín, teda pro napojení do spalinových cest. Provedení „Outdoor“ je pak vhodné pro použití do venkovních prostor. Použitý materiál je tak více přizpůsoben hrozbě koroze a teplotním vlivům. Pro aplikaci na konec komína je naopak vhodný odlučovač Airjekt 1 v provedení „Outdoor Top“ [33].



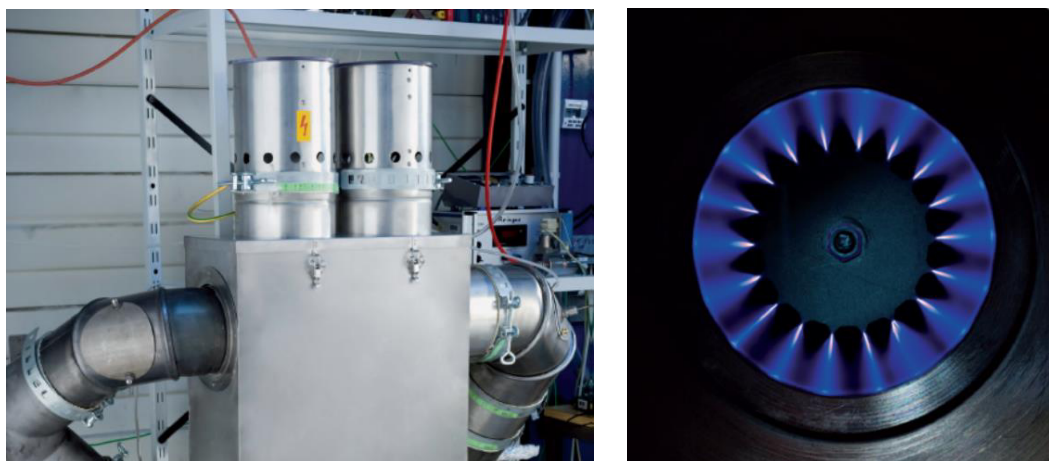
*Obr. 25 Provedení a design elektrostatického odlučovače částic Airjekt 1 typu „Outdoor–Top“. Převzato z [34].*

#### **4.5 Carola (Německo)**

*Tab. 7 Základní obecné a technické údaje o elektrostatickém odlučovači částic Carola [28; 35].*

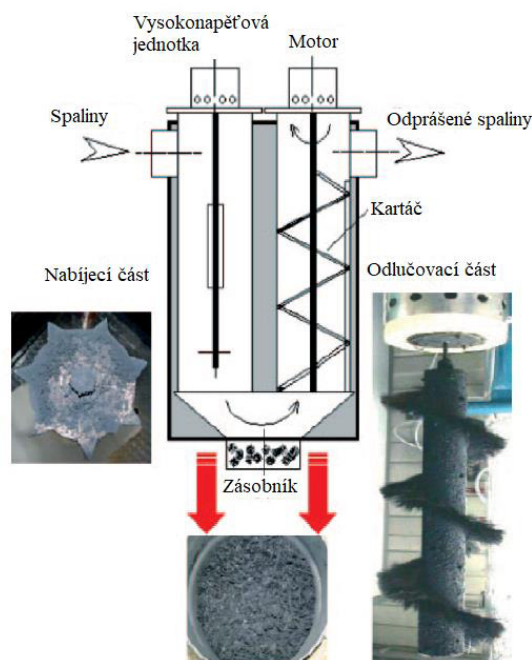
Jméno produktu:	Carola
Výrobce:	KIT
Země:	Německo
Cena:	Prototyp
Velikost odlučovače:	0,8×0,44×0,22 m
Napětí na elektrodě:	16–20 kV
Požadované napětí na zdroji:	230 V AC
Příkon:	~36 W
Výkon spalovacího zařízení:	~20 kW
Aplikace:	Kotle na biomasu (vč. pelet)
Odlučivost:	75–90 %

Dvoustupňový elektrostatický odlučovač částic (Obr. 26) byl vyvinut na Technologickém institutu v Karlsruhe, v Německu. První ionizační stupeň se skládá z vysokonapěťové elektrody a vysokonapěťového izolátoru. V něm dochází k nabíjení prachových částic, které se pak odlučují v druhém, sběracím, stupni odlučovače. Ten tvoří uzemněná sběrací elektroda a kovový kartáč (Obr. 27). Kartáč je součástí automatizovaného čistícího procesu. Rotuje v pravidelných intervalech vždy jednu minutu po hodině chodu. U paliva s větším obsahem popeloviny je možné interval zkrátit. Sběrač zachycených částic je pak pod elektrodami, odtud musí být ručně vyňat. Vysoká účinnost, automatické čištění a kompaktní design jsou největší přednosti odlučovače Carola. Na vstupu do zařízení by spaliny neměly přesáhnout teplotu 300 °C, aby nedošlo k poškození funkčních částí. Přesto, že se odlučovač komerčně nevyrábí, jeho možná cena při sériové výrobě pro 20 kW zařízení se odhaduje na cca. 1200 eur [35; 28].



*Obr. 26 Elektrostatický odlučovač částic Carola (vlevo); zachycený koronový výboj v ionizační části odlučovače (vpravo). Převzato z [35].*





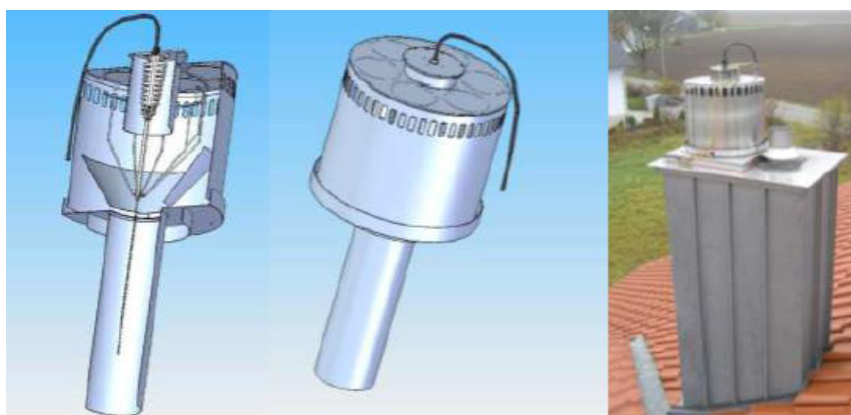
*Obr. 27 Schéma odlučovače s popisem jeho částí. Převzato z [35].*

#### 4.6 Residential ESP (Norsko)

*Tab. 8 Základní obecné a technické údaje o elektrostatickém odlučovači Residential ESP [29; 28].*

Jméno produktu:	Residential ESP
Výrobce:	APP
Země:	Norsko
Cena:	Prototyp
Průměr sběrací elektrody:	> 150 mm
Napětí na elektrodě:	30 kV
Požadované napětí na zdroji:	230 V AC
Příkon:	40–110 W
Výkon spalovacího zařízení:	3–20 kW
Aplikace:	Kotle na dřevní paliva
Odlučivost (0,04–8,7 $\mu\text{m}$ ):	85–99 %

Trubkový odlučovač sestavený v Norsku společností APP (Applied Plasma Physics AS) je ve vývoji již od roku 1996 a dodnes se nestal komerčním. Odlučovač je uchycen na konec komína, přičemž jej převyšuje asi o 0,5 m (viz Obr. 28). Výrobce uvádí vysokou účinnost při testování. Při testování v Norském technologickém institutu byly však naměřeny hodnoty 54–61 %. Při testech byl též častý výskyt jiskrového výboje s hlasitým zvukovým efektem. Důsledkem výbojů bylo též zničení nabíjecí elektrody. Čištění je prováděno manuálně při pravidelné údržbě komína (ideálně 2krát ročně). Odhadovaná cena při komerční výrobě by se měla pohybovat mezi 1000–2000 eury [29; 28].



*Obr. 28 Konstrukce a instalace elektrostatického odlučovače vyvinutého APP (Norsko).  
Převzato z [29].*

#### **4.7 Dry ESP (Německo)**

*Tab. 9 Základní obecné a technické údaje o elektrostatickém odlučovači Dry ESP vyvinutém společností Robert Bosch (Německo) [28].*

Jméno produktu:	Dry ESP
Výrobce:	Robert Bosch GmbH
Země:	Německo
Cena:	Prototyp
Průměr sběrací elektrody:	180 mm (150 mm pro ESP)
Délka odlučovače:	1,25 m
Napětí na elektrodě:	12–17 kV
Požadované napětí na zdroji:	230 V AC
Příkon:	34 W
Výkon spalovacího zařízení:	do 25 kW
Aplikace:	Kotle na pelety
Odlučivost (PM1):	70 %

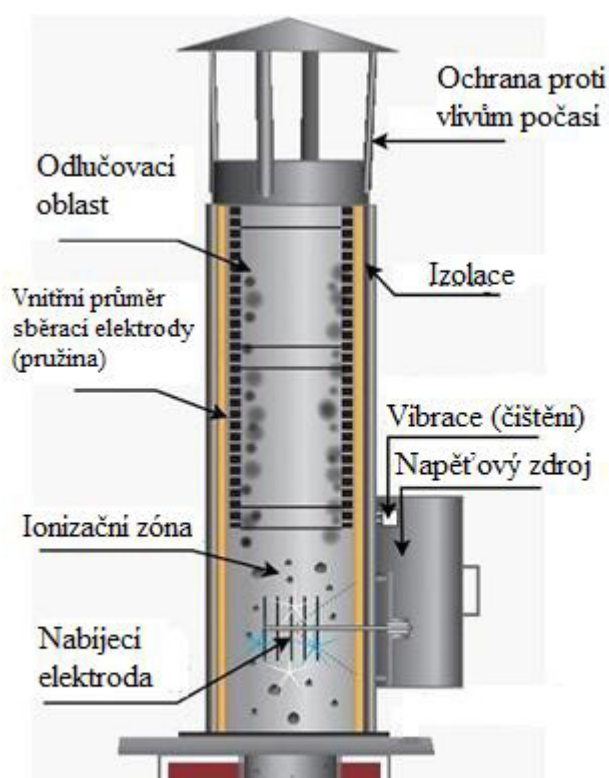
Trubkový odlučovač od společnosti Robert Bosch s poloautomatickým systémem čištění ploch je stále ve fázi prototypu. Na uvedení na trh nedosáhl především kvůli nedostatečné účinnosti. Cenově je staviteli odhadován na 1000–1100 euro se zabudovaným poloautomatickým systémem čištění na bázi pružiny [28].

#### 4.8 Ruff-kat ESP (Rakousko)

*Tab. 10 Základní obecné a technické údaje o elektrostatickém odlučovači částic Ruff-kat ESP [36].*

Jméno produktu:	Ruff-kat ESP
Výrobce:	Ruftec Feinstaubfilter
Země:	Rakousko
Průměr sběrací elektrody:	120–350 mm
Délka odlučovače:	do 1,2 m
Napětí na elektrodě:	26 kV
Požadované napětí na zdroji:	230 V
Příkon:	11 W
Výkon spalovacího zařízení:	do 40 kW
Aplikace:	Kotle na biomasu
Odlučivost:	až 70 %

Elektrostatický odlučovač částic Ruff–kat (Obr. 29) byl dle autorů vyvinut, aby odlehčil majitelům nevhodných spalovacích zařízení z hlediska nesplnění emisních limitů a zároveň jim nezmenshoval vnitřní prostory. Odlučovač je instalován na komíně a má zabudován automatický čistící systém na principu oklepávání elektrod. Tlakové změny jsou zanedbatelné. Příkon při „stand-by“ módu se pohybuje mezi 3–5 wattů. Zařízení bylo uvedeno do provozu několik desítek, a proto je uvedená hodnota pro odlučivost určena na základě testů s několika kotli různých výkonů a na více druhů biopaliv [36].



*Obr. 29 Provedení a popis elektrostatického odlučovače Ruff-kat. Převzato z [36].*

#### 4.9 Tabulkové porovnání elektrostatických odlučovačů částic

Tab. 11 Srovnávací tabulka výše uvedených elektrostatických odlučovačů.

	ÖEKOTUBE	ZUMIKRON	AL-TOP	AIRJEKT 1	CAROLA	Residential ESP	DRY ESP	RUFF-KAT
	(Švýcarsko)	(Německo)	(Německo)	(Německo)	(Německo)	(Norsko)	(Německo)	(Rakousko)
<b>Cena:</b>	~1000 €	~1200 €	~2000 €	~1500 €	–	–	–	–
<b>Suchý/mokrý odlučovač:</b>	Suchý	Suchý	Mokrý	Suchý	Suchý	Suchý	Suchý	Suchý
<b>Čištění:</b>	Manuální	Manuální	Automatizované	Manuální	Automatizované	Manuální	Poloautomatizovaný	Automatizované
<b>Pro kotle do výkonu:</b>	50 kW	35 kW	50 kW	50 kW	20 kW	20 kW	25 kW	40 kW
<b>Paliva:</b>	Biomasa a uhlí	Pelety a Štěpka	Pelety a Štěpka	Biomasa	Biomasa	Dřevní paliva	Pelety	Biomasa
<b>Napětí na elektrodě:</b>	15–30 kV	19–22,5 kV	–	<18 kV	16–20 kV	30 kV	12–17 kV	26 kV
<b>Příkon:</b>	20–30 W	<12 W	–	30 W	~36 W	40–110 W	34 W	11 W
<b>"Stand-by" mód:</b>	<1 W	–	–	2 W	–	–	–	3–5 W
<b>Odlučivost PM1:</b>	96,7–97,5 %	20–76 %					70 %	
<b>Celková odlučivost:</b>	65–97,5 %	20–81 %	<82 %	50–90 %	75–90 %	85–99 %		<70 %

#### **4.10 Shrnutí**

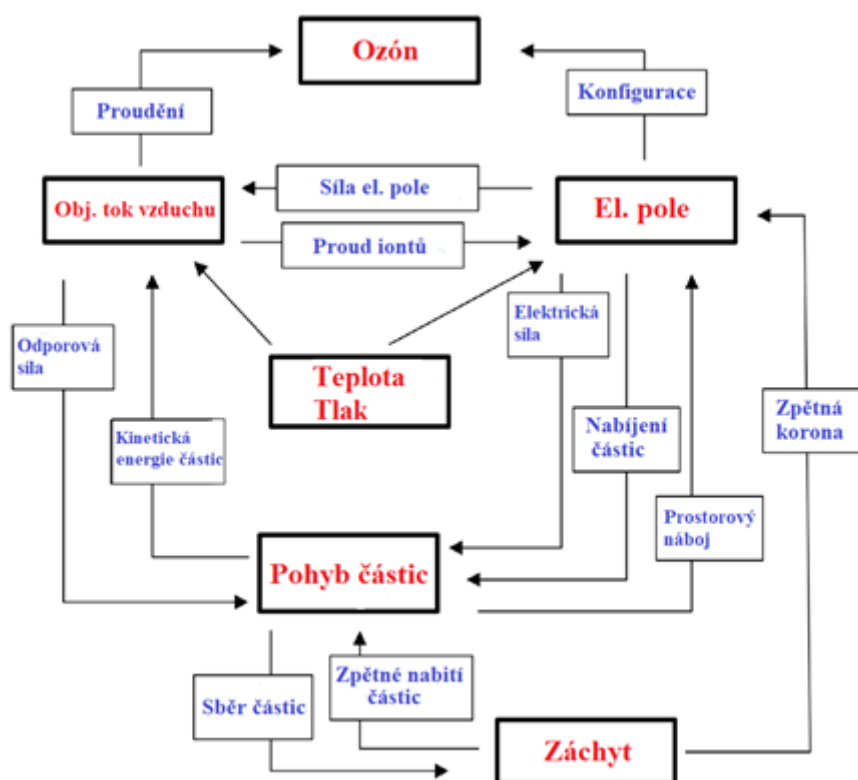
V Tab. 11 Srovnávací tabulka výše uvedených elektrostatických odlučovačů je provedeno srovnání nalezených elektrostatických odlučovačů určených pro kotle malých výkonů. Není snadné a objektivní porovnat funkčnost odlučovačů mezi sebou na základě výše vypsanych údajů. V dostupné literatuře chybí detailní data z testování, údaje o odlučovaných frakcích, na kterých byla účinnost měřena a za jakých okolních podmínek test proběhl. Stejně tak nelze uvedené údaje potvrdit při reálném použití, jelikož měření zařízení zpravidla probíhá v laboratořích a zkušebnách při mnohdy odlišných podmínkách a menších časových intervalech než ty, které nastanou při reálné instalaci, kdy například probíhá čištění elektrod od prachu jen dvakrát ročně při pravidelné údržbě, případně ještě méně často.

U všech těchto zařízení se neuvažuje změna tlaku v průběhu procesu. Tlakové rozdíly napříč technologií nebývají větší než 10 Pa. Jako velká nevýhoda u prozatím všech dostupných typů malých elektrostatických odlučovačů částic je cena. Pokud je odlučovač použit pro spalovací zařízení o malých výkonech (jak je taky předurčeno), znamená to, že investiční náklady do něj mohou mnohdy převýšit investici do samotného spalovacího zařízení, a tím se může stát u potenciálních spotřebitelů nechtěný [29; 28].

## 5. NÁVRH ELEKTROSTATICKÉHO ODLUČOVAČE

Tato kapitola se již zabývá samotným předběžným konstrukčním návrhem elektrostatického odlučovače. Sestává z popisu výpočtu a uvedení jednotlivých vztahů a veličin a informací souvisejících s návrhem zařízení. Pro potřeby konstrukčního návrhu malého odlučovače byl sestaven výpočetní model v prostředí MAPLE [37], který umožnil provedení porovnání návrhu s realizacemi komerčních elektrostatických odlučovačů, a také vytvoření různých konstrukčních scénářů s odlišnými konfiguracemi návrhu odlučovače, z kterých byly následně vybrána optimální podoba odlučovače.

Jak je patrné z Obr. 30, detailní výpočet odlučovače spočívá v zahrnutí mnoha aspektů, které mohou narušit nebo pozměnit chod odlučovacího procesu, ovlivnit konstrukci odlučovače a ve výsledku veličinu, která nás nejvíce zajímá, odlučivost. Při uvažování všech těchto faktorů, by bylo nutné provést komplikovanější výpočet. Takový postup je časově náročnější, byl proto zvolen prvotní a zjednodušený výpočet s využitím analytických výpočtů a metod.



Obr. 30 Fyzikální veličiny a jejich vztahy při elektrostatickém odlučování. Převzato z [38].



Aby bylo možné provést analytický výpočet, byla provedena mnohá zjednodušení a předpoklady. Uvažují se pouze částicemi kulového tvaru. V opačném případě nelze použít pro výpočet jinou než experimentální metodu. Předpokladem je i to, že se uvažuje s plně nabitými částicemi a jednorozměrný proud spalín je napříč průřezem trubky (sběrací elektrody) rovnoměrně rozvrstven. Tomu se lze v praxi nepatrně přiblížit instalací usměrňovací mříže na vstupu do odlučovací části. Přesto, že spaliny mají charakter turbulentního proudění, předpokládá se, že v blízkosti sběrací stěny dochází k proudění laminárnímu. Výpočet je však ošetřen i tím, že na stěně sběrací elektrody nefiguruje žádná vrstva již zachyceného prachu (předpoklad hladké stěny). Účinek zpětné korony se rovněž neuvažuje. Neuvažuje se s působením tzv. iontového větru, který se i tak u trubkových odlučovačů částic vyskytuje minimálně. Ten bývá jeden z hlavních zdrojů turbulence proudění. Jedná se proud iontů, vzniklých ionizací molekul vzduchu elektrony emitovanými na nabíjecí elektrodě. Dalšími předpoklady jsou nulová interakce mezi částicemi i zjednodušení, že rychlost spalín neovlivňuje rychlost částice směrem k odlučovací elektrodě. U spalovacího procesu se předpokládá konstantní výhřevnost paliva, neměnná teplota spalín na výstupu z kotle a konstantní účinnost kotle při změně výkonu. Změna výkonu by nemusela vůbec nastat, pokud by zařízení pracovalo například s akumulační nádrží, a tak by při spuštění pracovalo na stejné výkonové hladině. [14; 39].

Zanedbán je rovněž vliv rozdílné velikosti částic na charakter proudění. Počítá se však s tím, že je stále turbulentní. Byl proveden výpočet Reynoldsova podobnostního kritéria [14].

$$Re = \frac{\rho_s \cdot c \cdot d}{\mu} \quad [-] \quad (5.1)$$

Ve vztahu (5.1) vystupují rychlost spalín  $c$ , hustota spalín  $\rho_s$ , průměr trubkovité sběrací elektrody  $d = 2R$  a dynamická viskozita  $\mu = 1,83 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$  [15]. Pro hustotu spalín byla použita hodnota  $1,25 \text{ kg/m}^3$  odpovídající hustotě spalín vzniklých spalováním dřevní biomasy [40].

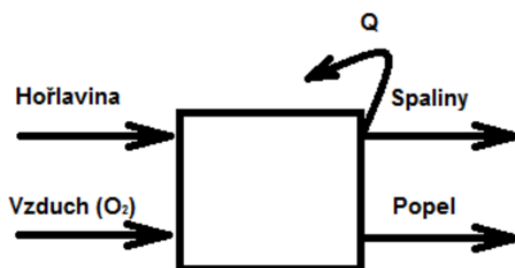
Pro Reynoldsovo číslo by měla platit podmínka [39]:

$$5 \cdot 10^3 < Re < 3 \cdot 10^4$$

aby nedocházelo k dalším nechtěným jevům, podepisujícím se na snižování účinnosti.

## 5.1 Spalování

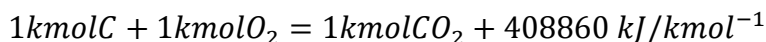
Spalování je chemická reakce, kdy spolu reagují hořlavé prvky paliva s kyslíkem za vzniku tepla. Rozlišujeme reakce exotermické (reakce slučování hořlavých prvků s kyslíkem za současného vzniku tepla) a endotermické (reakce probíhající pouze za přívodu tepla). Vstupní pracovní látky jsou palivo (hořlavina) a kyslík (obsažen ve vzduchu). Výstupními jsou pak spaliny a tuhý zbytek (popel). Při reakcích se část chemické energie přeměňuje na tepelnou (Obr. 31). Pro výpočet statiky spalování slouží stechiometrické vzorce. Dávají informaci o množství potřebného spalovacího vzduchu a o objemu a složení produktů spalování [41].



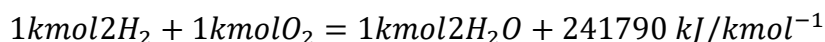
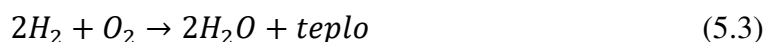
Obr. 31 Princip spalování. Převzato z [5].

Pro teoretický výpočet v téhle práci budeme uvažovat pouze spalování dokonalé. Spalování nedokonalé, které je specifikováno jako spalování při nedostatku vzduchu a s tím svázanými nechtěnými jevy (více popílku, sazí atd.), pro výpočet zanedbáme. Dokonalé spalování nastane tehdy, pokud za dostatečného množství vzduchu zreaguje veškerá hořlavina v palivu, tedy shoří. Rovnice uvedené dále v textu jsou převzaty z [41], pokud nebude uvedeno jinak. Pro dokonalé spalování platí následující stechiometrické vztahy [41; 42]:

- Spalování uhlíku na oxid uhličitý



- Spalování plynného vodíku na vodní páru<sup>3</sup>




---

<sup>3</sup> Pro kapalinu tvoří uvolněné teplo  $Q = 286800 \text{ kJ/kmol}^{-1}$

- Spalování síry na oxid siřičitý



### 5.1.1 Výpočet množství spalovacího vzduchu

Pro výpočet objemové spotřeby vzduchu je nutno znát minimální objemovou spotřebu suchého vzduchu pro spálení 1 kg paliva. Ta vychází z objemové spotřeby kyslíku při jeho spálení a ze složení suchého vzduchu (21 %  $O_2$ , 78 %  $N_2$ , 0,92 % Ar a 0,03 %  $CO_2$ ).

$$V_{vzmin}^s = \frac{100}{21} \cdot V_{O_2min} \quad [m_{vz}^3 \cdot kg^{-1}] \quad (5.5)$$

Výpočet minimální objemové spotřeby kyslíku při spálení 1 kilogramu paliva lze stanovit součtem spotřeby jednotlivých složek hořlaviny obsažené v palivu. Ve jmenovateli jsou uvedeny molární hmotnosti jednotlivých prvků hořlaviny. Za hodnoty jednotlivých prvků (C, S,  $H_2$  a  $O_2$ ) je pak uveden jejich hmotnostní zlomek. Tyto údaje by měly být uvedeny v popisu daného paliva, ať už ve formě hmotnostního zlomku nebo hmotnostních procent.

$$V_{O_2min} = \frac{22,39}{12,01} \cdot C + \frac{22,39}{4,032} \cdot H_2 + \frac{22,39}{32,06} \cdot S - \frac{22,39}{32} \cdot O_2 \quad [m_{O_2}^3 \cdot kg^{-1}] \quad (5.6)$$

Při této znalosti už lze dopočítat minimální objemovou spotřebu vlhkého vzduchu při spálení 1 kg paliva:

$$V_{vzmin} = f_s \cdot V_{vzmin}^s \quad [m_{vz}^3 \cdot kg^{-1}], \quad (5.7)$$

kde  $f_s$  je bezrozměrný faktor poměrného zvětšení objemu suchého vzduchu:

$$f_s = 1 + V_{H_2O} \quad [-] \quad (5.8)$$

Ten je vypočítán se znalostí objemu vodní páry (připadající na 1 m<sup>3</sup> vzduchu), která odpovídá určitému tlaku a relativní vlhkosti vzduchu. Vodní pára pak ve výsledku objem vzduchu zvětšuje:

$$V_{H_2O} = \frac{\varphi}{100} \cdot \frac{p''}{p_c - \frac{\varphi}{100} \cdot p''} \quad [-], \quad (5.9)$$

$\varphi$  [%] je relativní vlhkost vzduchu. V rovnici (5.9) dále vystupují celkový absolutní tlak  $p_c$  [Pa] a absolutní tlak vodní páry na mezi sytosti při dané teplotě vzduchu  $p''$  [Pa].

Protože je technicky nereálné spalovat pouze při teoretickém množství spalovacího vzduchu, bývá do topeniště přiváděno vzduchu víc, než kolik je potřeba dle teoretických vztahů. To vše z důvodu, aby se v dostatečném množství promísily molekuly hořlavých látek s molekulami kyslíku a omezilo se tak nedokonalé spalování. Množství přivedeného vzduchu při spalování při přebytku se pak vypočítá ze vztahu:

$$V_{vz} = V_{vz_{min}} \cdot \alpha \quad [m^3 \cdot kg^{-1}] \quad (5.10)$$

kde  $\alpha$  je součinitel přebytku vzduchu ( $\alpha > 1$ ). Jedná se o poměr skutečně přivedeného vzduchu a minimální objemové spotřeby vlhkého vzduchu. Spalování bez přebytku vzduchu je označováno za spalování stechiometrické. Pro roštová ohniště se součinitel přebytku vzduchu uvažuje mezi 1,25–1,5 [41].

### 5.1.2 Výpočet množství spalin

Obdobně jako u výpočtů spalovacího vzduchu je třeba začít minimálním objemem. Minimální (teoretický) objem suchých spalin z dokonalého spálení 1 kg paliva je dán součtem objemových složek oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>), oxidu siřičitého (SO<sub>2</sub>), dusíku (N<sub>2</sub>) a argonu (Ar).

$$V_{sp_{min}}^s = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{Ar} \quad [m^3 \cdot kg^{-1}] \quad (5.11)$$

Konkrétněji součtem objemu oxidu uhličitého z hořlaviny a ze spalovacího vzduchu:

$$V_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot C + \frac{1}{100} \cdot 0,03 \cdot V_{sp_{min}}^s \quad [m_{CO_2}^3 \cdot kg^{-1}], \quad (5.12)$$

oxidu siřičitého z hořlaviny:

$$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot S \quad [m_{SO_2}^3 \cdot kg^{-1}], \quad (5.13)$$

dusíku z hořlaviny a spalovacího vzduchu:

$$V_{N_2} = \frac{22,40}{28,013} \cdot N_2 + \frac{1}{100} \cdot 78,05 \cdot V_{sp_{min}}^s \quad [m_{N_2}^3 \cdot kg^{-1}], \quad (5.14)$$

a argonu obsaženém ve spalovacím vzduchu:

$$V_{Ar} = \frac{1}{100} \cdot 0,92 \cdot V_{sp_{min}}^s \quad [m_{SO_2}^3 \cdot kg^{-1}] \quad (5.15)$$

Protože je uvažováno pouze dokonalé spalování, nebude uvažován vznik NO a NO<sub>2</sub>, známých pod souhrnným názvem NO<sub>x</sub>. Dále je nutno vypočítat minimální (teoretický) objem vlhkých spalin:

$$V_{sp_{min}} = V_{sp_{min}}^s + V_{H_2O}^{sp} \quad [m_{sp}^3 \cdot kg^{-1}], \quad (5.16)$$

kde  $V_{H_2O}^{sp}$  je vodní pára z hořlaviny (H<sub>2</sub>), vlhkosti v palivu a vlhkosti spalovacího vzduchu.

$$V_{H_2O} = \frac{44,81}{4,032} \cdot H_2 + \frac{22,41}{18,015} \cdot W^r + (f - 1) \cdot V_{vz_{min}}^s \quad [m_{H_2O}^3 \cdot kg^{-1}] \quad (5.17)$$

Pro získání skutečného objemu spalin už jen stačí dosadit do vzorce:

$$V_{sp} = V_{sp_{min}} + (\alpha - 1) \cdot V_{vz_{min}} \quad [m_{sp}^3 \cdot kg^{-1}] \quad (5.18)$$

### 5.1.3 Objemový průtok

Objemový průtok spalin lze vypočítat se znalostí objemu spalin a hmotnostního toku paliva ( $\dot{m}_h$ ). Přísun paliva v čase je většinou uveden pro jmenovitý výkon spalovacího zařízení a bývá uveden v technických listech a návodech daných zařízení. Se znalostí potřebných geometrií je možné spočítat rychlost spalin, která je i v této práci nezbytná pro výpočet odlučivosti.

$$\dot{Q}_s = \frac{V_{sp} \cdot \dot{m}_h}{3600} \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (5.19)$$

### 5.1.4 Zvolené spalovací zařízení

Jako spalovací zařízení, pro které bude elektrostatický odlučovač částic navrhován, byl zvolen teplovodní kotel na dřevní pelety a agropelety VERNER A251. Tento automatický teplovodní kotel byl zvolen především proto, že je prezenčně k dispozici v laboratoři Energetického ústavu VUT FSI, na kterém je tato práce zpracovávána. Výpočet na něm může být tedy prakticky ověřen. Jmenovitý tepelný výkon kotle je 25 kW a lze jej nastavit pro výkon 30–120 %, tedy 7,5–28 kW. Změna nastavení se výrazně projeví v účinnosti odlučovacího zařízení. Další specifiky kotle jsou uvedena v Tab. 12 [43].

Tab. 12 Parametry zvoleného spalovacího zařízení [43].

<b>Kotel Verner A251</b>	
Jmenovitý výkon:	25 kW
Regulovatelnost výkonu:	7,5–28 kW
Účinnost:	92 %
Spotřeba pelet (při jmenovitém výkonu):	5,8 kg/h
Hmotnost kotle:	520 kg
Vodní objem kotle:	60 l
Teplota spalin (při jmenovitém výkonu):	160 °C
Třída účinnosti:	3.
Emisní třída:	3.

### 5.1.5 Použité palivo

Předpokládané parametry použitého paliva, dřevních pelet, byly převzaty z [44]. Jedná se tedy o reálné dřevní pelety, které na hraně splňují kvalitativní A1 třídu podle normy EN 14961-2.

*Tab. 13 Prvkový rozbor a výhřevnost použitého paliva [44].*

<b>Dřevní pelety</b>			
Výhřevnost	$Q^r$	[MJ/kg]	17,15
Veškerá voda	$W^r$	hm %	7,61
Uhlík	C	hm %	47,05
Vodík	H <sub>2</sub>	hm %	6,33
Dusík	N <sub>2</sub>	hm %	0,29
Síra	S	hm %	0,031
Kyslík	O <sub>2</sub>	hm %	38,5

U dřevních pelet množství vodíku pohybuje kolem 6 hm. % (hmotnostních procent) a dle normy by vlhkost v materiálu po dokončení procesu peletování neměla přesahovat 10 hm. %. Při letmém pohledu na Tab. 13. lze vidět, že se jedná o vyhovující palivo. Pokud by nebyl k dispozici údaj o výhřevnosti paliva, lze jej s malou odchylkou dopočítat dle vztahu [4]:

$$Q^r = Q^s \cdot 1 - \left(\frac{W^r}{100}\right) - 2,447 \cdot \frac{W^r}{100} - \frac{H_2}{200} \cdot 18,02 \cdot 2,447 \cdot \left(1 - \frac{W^r}{100}\right) \quad [MJ \cdot kg^{-1}] \quad (5.20)$$

kde  $Q^s$  je spalné teplo, tedy teplo uvolněné spálením 1 kg paliva bez uvažování přeměny obsažené vody na vodní páru, a tak není hodnota redukována o spalné teplo. Spalné teplo se u dřevních pelet pohybuje v rozmezí 19,8–20,7 MJ/kg. Pro potřeby výpočtu se většinou volí hodnota 20 MJ/kg [4].

## 5.2 Elektrostatický odlučovač částic

Koronový výboj a princip jeho vzniku již byl popsán výše, v kapitole 3. V podkapitole 5.2 výpočetní vztahy vycházejí z [14] pokud nebude uvedeno jinak. Pro výpočet elektrického pole, v kterém vzniká proces ionizace, a tak se může iniciovat koronový výboj, lze použít vzorec:

$$E_0 = A\delta + B\sqrt{\frac{\delta}{r_0}} \quad [V \cdot m^{-1}] \quad (5.21)$$

kde jsou použity empirické konstanty, charakterizující polaritu plynu:

$$A = 3,2 \cdot 10^6 [V \cdot m^{-1}] \quad B = 9 \cdot 10^4 [V \cdot m^{-1/2}]$$

V rovnici (5.21) vystupuje rovněž poloměr nabíjecí elektrody  $r_0$ . Na její geometrii intenzita počátečního elektrického pole přímo závisí. Vzorec je platný za předpokladu dokonale hladké plochy elektrod. Pro praktické aplikace se uvažuje dále faktor drsnosti povrchu  $f = 0,6$  (pro hladké plochy  $f = 1$ ). Pro praktické aplikace bývá používána rovnice [21]:

$$E_0 = 3 \cdot 10^6 \cdot f \left( \delta + 0,03 \sqrt{\frac{\delta}{r_0}} \right) \quad [V \cdot m^{-1}] \quad (5.22)$$

Relativní hustota plynu  $\delta$  udává poměr aktuálního stavu plynu vůči plynu za normálních podmínek, tedy teplotě 0 °C a tlaku 100 kPa:

$$\delta = \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{T_1}{T_2} \quad (5.23)$$

Napětí, potřebné pro překonání síly této elektrické intenzity, přímo závisí na konfiguraci obou elektrod, tedy nabíjecí a sběrací. Počáteční napětí je funkcí poloměru sběrací elektrody. Ve výpočtu tedy hraje roli i samotná geometrie odlučovače. Pro konfiguraci trubka–drát je použit vzorec:

$$U_0 = E_0 \cdot r_0 \cdot \ln \frac{R}{r_0} \quad [V], \quad (5.24)$$



kde je při prvním pohledu vidět, jak lze ovlivňovat počáteční napětí při změnách geometrie. Při zvětšování poloměru sběrací elektrody (trubky) poroste i potřebné napětí.

### 5.2.1 Proudová hustota, elektrický proud a příkon

Pro výpočet procházejícího elektrického proudu, respektive proudové hustoty je třeba znát konstantu pohyblivosti iontů  $b$ . Je to konstanta proporcionality elektrického pole vzniklého mezi elektrodami. Pohyblivost iontů je odvozena z kinetické teorie plynů, nicméně je doporučováno využívat experimentálně zjištěné hodnoty. Experimentálně bylo zjištěno, že pohyblivost iontů je téměř inverzně proporcionální relativní hustotě plynu  $\delta$  (viz rovnice 5.25).

$$b = \frac{b_0}{\delta} \quad [m^2 \cdot Vs^{-1}] \quad (5.25)$$

Konstanta  $b_0$  je v tomto případě pohyblivost iontů za normálních podmínek.

$$b_0 = 2 \cdot 10^{-4} \quad [m^2 \cdot Vs^{-1}] \quad (5.26)$$

Celkový elektrický proud  $i$  je u trubkových odlučovačů závislý na celkovém obsahu odlučovací plochy nabíjecí elektrody. Ve vzorci dále vystupuje proudová hustota na sběrací elektrodě  $j$ :

$$i = j \cdot 2\pi R \cdot l \quad [A] \quad (5.27)$$

Pro výpočet proudové hustoty je použit výpočet podle Townsenda pro vyšší proudy, což nahrazuje zjednodušený výpočet v případě nižších hodnot velikosti proudu:

$$\Psi_t = \sqrt{1 + \Phi_t} - 1 - \ln \frac{1 + \sqrt{1 + \Phi_t}}{2} \quad [-] \quad (5.28)$$

$$\Psi_t = \frac{U - U_0}{U_0} \cdot \ln \frac{R}{r_0} \quad [-] \quad (5.29)$$

$$\Phi_t = \left( \frac{R}{E_0 \cdot r_0} \right)^2 \cdot \frac{R \cdot j}{\varepsilon_0 \cdot b} \quad [-], \quad (5.30)$$

kde  $\Psi_t$  a  $\Phi_t$  jsou konstanty definované vztahy (5.29) a (5.30). Z nich je možné vyjádřit proudovou hustotu  $j$  [ $A \cdot m^{-2}$ ]. Ve vztazích pro výpočet proudové hustoty potažmo elektrického proudu vystupuje permitivita vakua  $\varepsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{12}$  As/Vm. Použité napětí  $U$  je volená veličina, přičemž by měla výrazně převyšovat počáteční koronové napětí  $U_0$ , aby byl koronový výboj stabilní a účinnost odlučovacího zařízení co možná nejvyšší. Neměla by však přesáhnout jiskrové napětí, které bývá podle dostupných zdrojů až o 25 kV vyšší než napětí počáteční. V takovém případě by místo koronového výboje došlo k výboji jiskrovému. Příkon elektrostatického odlučovače pak lze dopočítat dle vztahu:

$$P = U \cdot i \quad [W] \quad (5.31)$$

### 5.2.2 Elektrický náboj částic

K nabíjení částic může docházet dvěma způsoby, jak bylo zmíněno v kapitole 3, a to polarizací a difuzí. Zatímco k nabíjení částic polarizací je potřeba elektrické pole, difúze je způsobená volným pohybem iontů závislým na teplotě a popsáným jako Brownův pohyb. K oběma těmto procesům dochází současně. Aby nebylo nutno počítat oba způsoby zvlášť a pracným způsobem, je možno využít pro výpočet celkového náboje tzv. Cochetův model, který je oba spojuje. Dle porovnání více výpočtů velikosti elektrického náboje je tenhle nejjednodušší a zároveň se výsledek od jiných typů výpočtů výrazně neliší.

$$Q_p = \left( \left( 1 + \frac{2\lambda}{d_p} \right)^2 + \left( \frac{2}{1 + \frac{2\lambda}{d_p}} \right) \cdot \left( \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} \right) \right) \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot d_p^2 \cdot E \quad [C] \quad (5.32)$$

Ve vzorci (5.32) vystupuje průměr frakce  $d_p$ , relativní permitivita částic  $\varepsilon_r$ , permitivita vakua  $\varepsilon_0$  a intenzita elektrického pole  $E$ , která je pro tento výpočet uvažována jako intenzita elektrického pole na sběrací elektrodě. Proto je ve vztahu (5.33) jako vzdálenost od nabíjecí elektrody uvažován poloměr sběrací elektrody  $R$ .

$$E = \sqrt{\frac{R \cdot j}{\varepsilon_0 \cdot b} + \frac{r_0}{R} \cdot \left(E_0^2 - \frac{R \cdot j}{\varepsilon_0 \cdot b}\right)} \quad [V \cdot m^{-1}] \quad (5.33)$$

Dále ve vzorci pro intenzitu elektrického pole na sběrací elektrodě vystupují proudová hustota  $j$ , pohyblivost iontů  $b$ , poloměr nabíjecí elektrody  $r_0$  a počáteční intenzita elektrického pole  $E_0$ . Pro výpočet velikosti elektrického náboje částice je ještě významná střední volná dráha molekul plynu mezi srážkami  $\lambda$ :

$$\lambda = 6,61 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\frac{T}{273}\right) \cdot \left(\frac{100 \cdot 10^3}{p}\right) \quad [m], \quad (5.34)$$

kde vystupuje poměr teploty a tlaku prostředí vzhledem k normálním podmínkám.

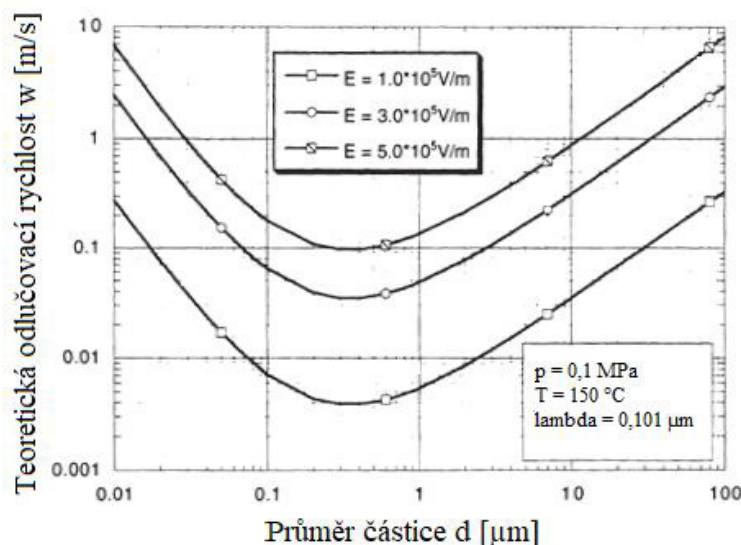
### 5.2.3 Odlučovací (driftová) rychlost

Teoretická odlučovací (driftová) rychlost vystupuje ve vzorci pro odlučivost jak u Deutsch-Andersonova, tak Matts-Ohnfeldtova vztahu a jejich dalších transformací. Vystihuje rychlost nabitých prachových částic o dané velikosti směrem k sběrné elektrodě. Její výpočet závisí na náboji částice po dostatečně dlouhé době ( $\infty$ ), intenzitě elektrického pole (na sběrací elektrodě), dynamické viskozitě spalin, velikosti (průměru) prachové částice a korekčním (Cunninghamově) faktoru, který zahrnuje podmínky prostředí v podobě teploty a tlaku (viz rovnice (5.35)):

$$w_{th} = \frac{Q_p^\infty E}{3\pi\mu d_p} \cdot C \quad [m \cdot s^{-1}], \quad (5.35)$$

$$C = 1 + 1,246 \cdot \frac{2\lambda}{d_p} + 0,42 \cdot \frac{2\lambda}{d_p} \cdot \exp\left(-0,87 \cdot \frac{d_p}{2\lambda}\right) \quad [-] \quad (5.36)$$

Čím silnější je tedy elektrické pole (vyšší napětí), tím je odlučování částic jednodušší. To lze říct i o velikosti částice. Ty o větším průměru se odlučují snáz. Existuje řada obměněných vzorců pro výpočet migrační rychlosti, nicméně s přihlédnutím k použité literatuře a tomu, že se jedná o trubkový odlučovač byl zvolen právě tento způsob. Stejně jako na Obr. 5 je i na Obr. 32 patrný pokles hodnot driftové rychlosti v oblasti menších částic. Jedná se o přechodovou oblast, kdy se z difuzního nabíjení u částic menších  $1\mu m$  přechází pozvolna na zvyšující se vliv nabíjení částic polarizací [14; 15].



Obr. 32 Vykreslení teoretické odlučovací rychlosti jako funkce velikosti částice pro tři různé intenzity elektrického pole mezi elektrodami při teplotě 150 °C a relativní permitivitě  $\epsilon_r = 10$ .

Převzato z [14]

## 5.2.4 Odlučivost

Protože je dokázáno, že účinnost elektrostatického odlučovače se zmenšuje s rostoucí rychlostí proudění plynu, jsou právě vlastnosti proudění uvažovány jako stěžejní parametr výpočtu. S tím rovněž přímo souvisí geometrie, kdy rychlost spalin v odlučovači je přímo funkcí průřezu trubkové elektrody. Vztahy pro výpočet odlučivosti tyto závislosti přímo či nepřímo obsahují. V této práci bylo použito vícero modelů pro výpočet odlučivosti, které byly v praktické části vzájemně porovnány jako výstup vytvořeného výpočetního modelu. Výpočet odlučivosti dle teoretického Deutsch–Andersonova vztahu (dále jen D-A) z roku 1922 je nejstarší a nejjednodušší stále používaný vztah. Rovnice vychází z několika předpokladů, jako například to, že částice jsou kulového tvaru a plně nabitě, tok částic je stejný v každém místě průřezu trubky, přičemž koncentrace prachu se mění jen ve směru proudění plynu, rychlost proudění nijak nenarušuje odlučovací rychlost částic nebo že částice mezi sebou nijak neinteragují. Dále se předpokládá například nulový vliv srážek iontů a neutrálních molekul plynu nebo nulový únik již odloučených částic do proudu spalin [14; 13].

D-A vztah pro odlučivost zahrnuje mnohá zjednodušení a předpoklady, jež jej vzdalují od skutečných hodnot a působí trochu zastarale. I proto vznikají nejrůznější modifikace D-A modelu doplněné o empirické konstanty. Rovnice (5.2) vyjadřuje původní výpočetní vztah [14]:

$$\eta_{D-A} = 1 - \exp\left(-\frac{w_{th} \cdot S}{c \cdot A}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{w_{th} \cdot S}{\dot{Q}_s}\right) \quad [-], \quad (5.37)$$

kde  $w_{th}$  je odlučovací rychlost, obsah sběracích ploch na sběrací elektrodě  $S$  a objemový průtok spalin  $\dot{Q}_s$  ( $\dot{Q}_s = c \cdot A$ ), kde  $c$  je rychlost proudění spalin a  $A$  je průřez trubky.

Jeden z nejpoužívanějších modifikovaných vztahů je Matts–Öhnfeldtova (dále jen M–Ö) rovnice, která generuje mnohem realističtější výsledky než původní rovnice z roku 1922. D–A rovnice je v tomto případě modifikována na [14]:

$$\eta_{M-\ddot{O}} = 1 - \exp\left(-\left(\frac{w_{th} \cdot S}{\dot{Q}_s}\right)^k\right) \quad [-], \quad (5.38)$$

kde vystupuje, kromě již zmíněných veličin, ještě konstanta  $k$ , která v sobě zahrnuje několik procesních proměnných a pohybuje se v rozmezí od 0,4 do 0,6 [19]. Pro výpočet v této diplomové práci byla zvolena doporučená hodnota 0,5. Tato metoda může být aplikována, pokud jsou maximalizovány elektrické podmínky a teplota je konstantní [14].

Smidthův vztah byl poprvé použit v roce 1967 (viz rovnice (5.39)). Oproti přechozím výpočtům odlučovací účinnosti v něm dále vystupuje empiricky zjištěná konstanta  $b_s$ , která byla pro většinu případů stanovena na 0,22. Platí za předpokladů, kterými je rovnoměrné proudění v průřezu trubky, žádný návrat již zachycených částic do proudu spalin nebo nulový výskyt zpětné ionizace [14; 19].

$$\frac{1}{1-\eta_{sm}} = (1 + b \cdot \frac{S}{\dot{Q}_s} \cdot w_{th})^{1/b_s} \quad [-] \quad (5.39)$$

Nejnovější z rovnic, které byly využity v této práci je Ortizův vztah [19], publikovaný v roce 2010. S uvažováním několika bezrozměrných parametrů dosahuje rovnice uspokojivějších výsledků ve srovnání s experimentálně naměřenými daty.

$$\eta_{or} = 1 - 1.042 \cdot \exp(-N_{De}^{0,612}) \quad [-] \quad (5.40)$$

Rovnice uvažuje faktor turbulence, elektro–hydrodynamické jevy a Deutschovo číslo ( $N_{De}$ ). Nejlepší shody Ortizova metoda dosahuje dle dostupných zdrojů při odlučivosti částic o velikosti 12  $\mu\text{m}$  [19]. Deutschovo číslo je funkcí teoretické migrační rychlosti  $w_{th}$ , délky nabíjecí elektrody  $l$ , rychlosti spalin  $c$  a vzdálenosti mezi elektrodami  $R$ , viz rovnice (5.41) [14].

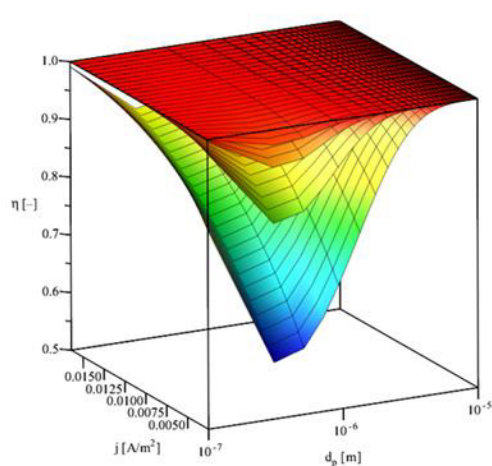
$$N_{De} = \frac{w_{th} \cdot l}{R \cdot c} \quad [-] \quad (5.41)$$

### 5.3 Matematický model výpočtu a jeho scénáře

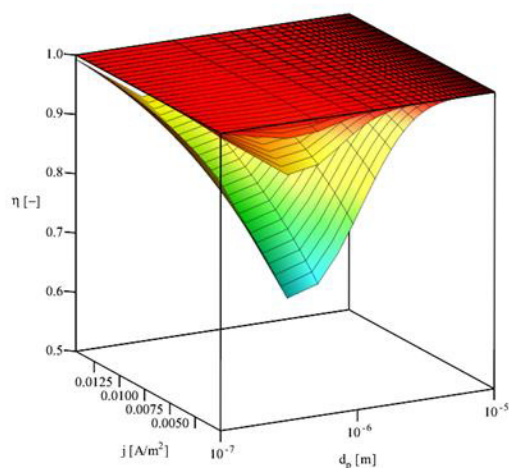
Pro lepší pochopení výpočtu a vlivů jednotlivých proměnných veličin bylo na základě podkapitol 5.1 a 5.2 vytvořeno 8 různých scénářů (různých geometrických konfigurací odlučovače s rozdílnými parametry napájení), pro které byly vykresleny grafy jejich závislostí na údajích, které jsou při návrhu nejvíce stěžejní: účinnost odlučovacího procesu a elektrický příkon odlučovače. Jsou vykresleny mimo jiné vždy v závislosti na proudové hustotě, nikoliv napětí. To je v grafech v několika případech doplněno na základě odpovídající hodnoty pro proudovou hustotu. Počáteční intenzita elektrického pole je zde počítána dle vztahu (5.21), tedy pro dokonale hladký povrch elektrod. Z ní je přímo vyčísleno počáteční napětí. To přímo ovlivňuje grafy způsobem, že osa proudové hustoty začíná pokaždé při jiné hodnotě napětí. Počáteční napětí roste jak při zvětšování poloměru nabíjecí elektrody (skokově), tak i při zvětšování poloměru elektrody sběrací. Z pohledu přivedeného napětí jsou tak 3D grafy na Obr. 33 a 35 jen stěží porovnatelné a bylo třeba přistoupit k více typům grafů. Tyto grafy byly vykreslovány vždy jen pro průběhy odpovídající 100 % jmenovitého tepelného výkonu kotle. Při změně tepelného výkonu mohou zjištěné parametry kolísat a výsledné hodnoty se lišit. Pro výpočet byla u všech scénářů zvolena relativní permitivita částic  $\epsilon_r = 5$ .

V grafech na Obr. 33 a 34 se nachází plochy a křivky vykreslené pro 4 různé poloměry nabíjecí elektrody ( $r_o$ ), které byly voleny postupně v rozmezí 0,5–2 mm. Byl tím sledován vliv její velikosti na parametry odlučovače. Konstantní v tomto případě zůstávají délky elektrod (pro každý jeden průběh), pro které je průběh vykreslen a poloměr sběrací elektrody. Na Obr. 33 je možné vidět, jak se s postupným zvětšováním poloměru nabíjecí elektrody účinnost zvětšuje, a to nejvíce v oblasti menších poloměrů. Účinnost se zvětšuje i při zvyšování délky elektrod, kdy při délce  $L = 2$  m, je za zvolených podmínek a při uvažování dokonale hladkých ploch

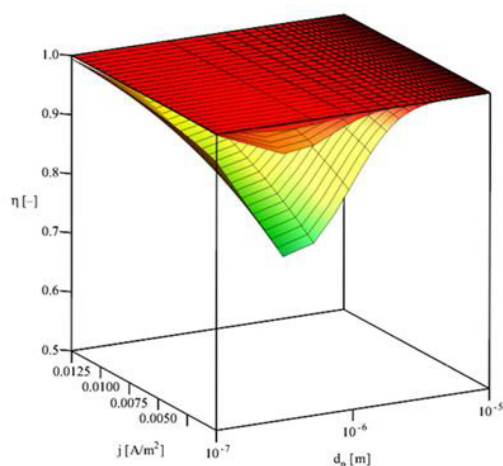
odlučivost téměř rovna 100 %. Na Obr. 34 jsou vykresleny grafy, které geometriemi korespondují s těmi na Obr. 33, pouze s tím rozdílem, že je v nich vykreslován průběh elektrického příkonu odlučovače. Se zvětšujícím se poloměrem nabíjecí elektrody, se hodnota příkonu při stejném napětí snižuje. To, proč to nemusí být vždy pozitivní výsledek, bude blíže vysvětleno u dalších typů grafů. Příkon je v grafech vykreslen v logaritmickém měřítku.



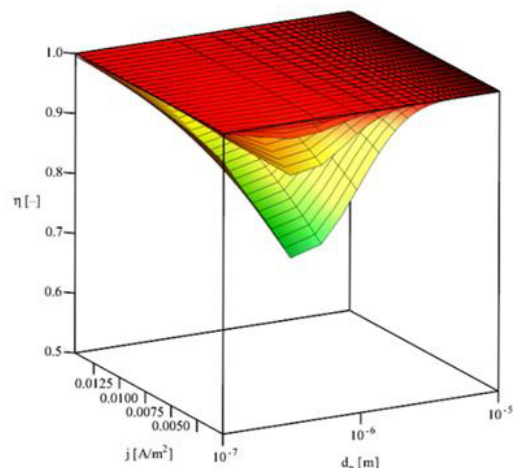
a)



b)

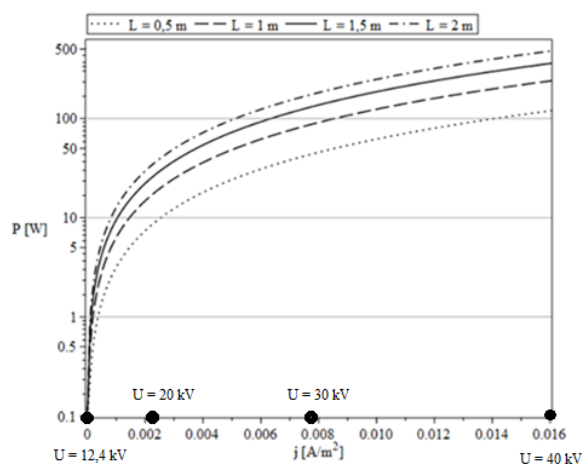


c)

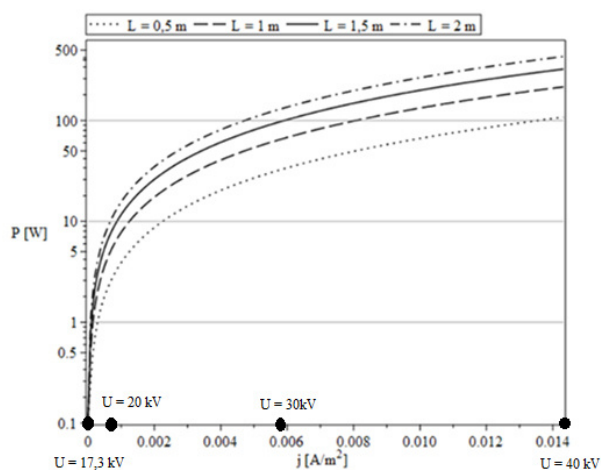


d)

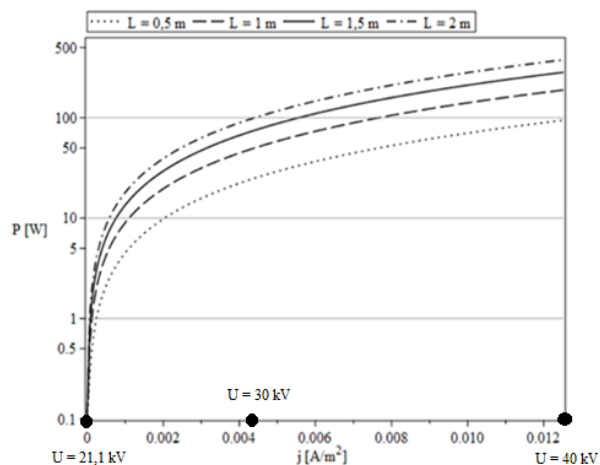
*Obr. 33 Účinnost odlučování jednotlivých velikostních frakcí částic v závislosti na proudové hustotě a proměnném průměru nabíjecí elektrody  $r_0$ . Délky elektrod (čtyři průběhy v každém grafu) byly voleny v krocích 0,5 m, 1 m, 1,5 m a 2 m. Jsou zobrazeny konfigurace:*  
a)  $R = 60$  mm,  $r_0 = 0,5$  mm,  $U_0 = 12355$  V, b)  $R = 60$  mm,  $r_0 = 1$  mm,  $U_0 = 17325$  V,  
c)  $R = 60$  mm,  $r_0 = 1,5$  mm,  $U_0 = 21136$  V, d)  $R = 60$  mm,  $r_0 = 2$  mm,  $U_0 = 24315$  V.



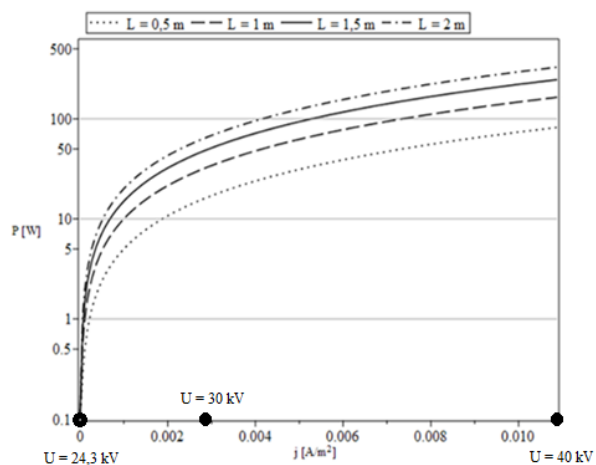
a)



b)



c)



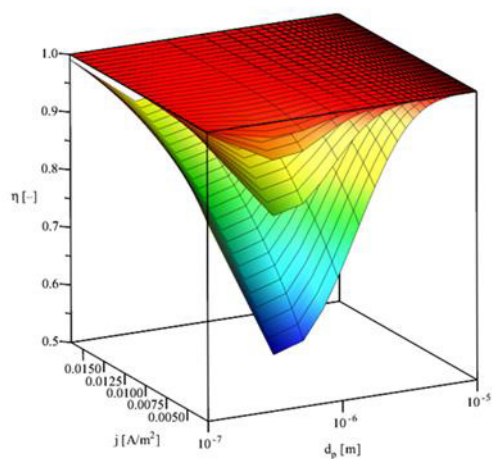
d)

Obr. 34 Grafy příkonu elektrostatického odlučovače v závislosti na proudové hustotě (korespondující s přivedeným napětím) a proměnném průměru nabíjecí elektrody  $r_0$ . Délky elektrod (čtyři průběhy v každém grafu) byly voleny v krocích 0,5 m, 1 m, 1,5 m a 2 m. Jsou zobrazeny konfigurace:

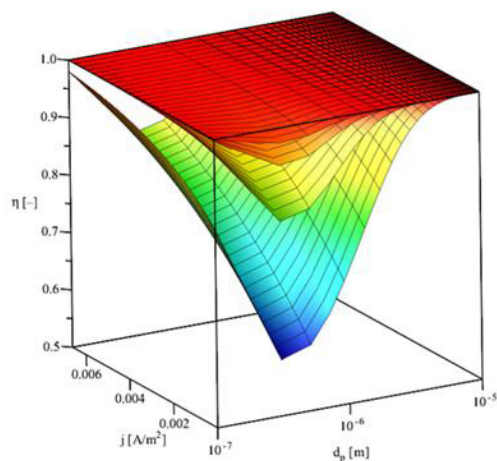
- a)  $R = 60$  mm,  $r_0 = 0,5$  mm,  $U_0 = 12355$  V, b)  $R = 60$  mm,  $r_0 = 1$  mm,  $U_0 = 17325$  V,  
c)  $R = 60$  mm,  $r_0 = 1,5$  mm,  $U_0 = 21136$  V, d)  $R = 60$  mm,  $r_0 = 2$  mm,  $U_0 = 24315$  V.



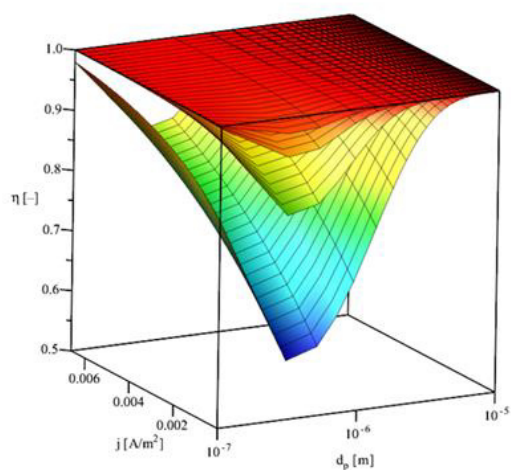
V grafech na Obr. 35 a 36 se nachází plochy a křivky vykreslené pro scénář s proměnným poloměrem sběrací elektrody ( $R$ ). Ten se pohybuje v rozmezí 60–120 mm. Konstantami jsou pak opět délky elektrod a poloměr nabíjecí elektrody. Na Obr. 35 je patrný růst účinnosti při zvětšujícím se poloměru  $R$ , ale oproti Obr. 33 mnohem mírnější. U těchto grafů jsou rovněž podobné počáteční napětí, a tak mohou být bez detailnějšího zkoumání k nerozeznání. Oproti předchozím případům, se ale při změně poloměru sběrací elektrody mění skokově příkon. Patrné je to při pohledu na Obr. 36. Zvětšováním průměru sběrací elektrody za zachování průměru elektrody nabíjecí, se mění poloměr zakřivení, který tak zjednodušuje vznik výboje. Při fixním napětí se tak značně snižuje potřebný příkon. Příkon je mnohem nižší při téměř celém rozmezí proudové hustoty, což je udržitelné pro provoz. Zařízení se tak může pohybovat v oblasti nižších příkonů a zároveň při přivedeném napětí, které je dostatečně vzdáleno hodnotě napětí počátečního. Koronový výboj je tak stabilnější.



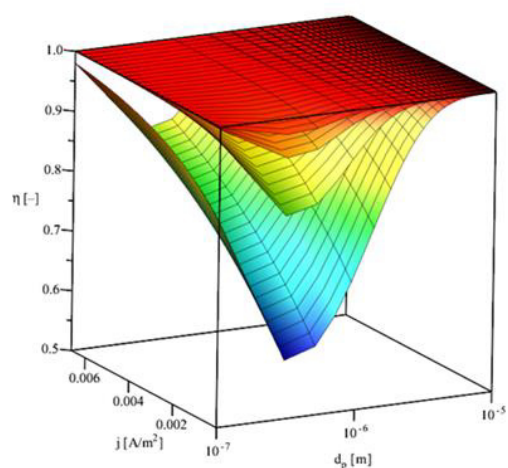
a)



b)



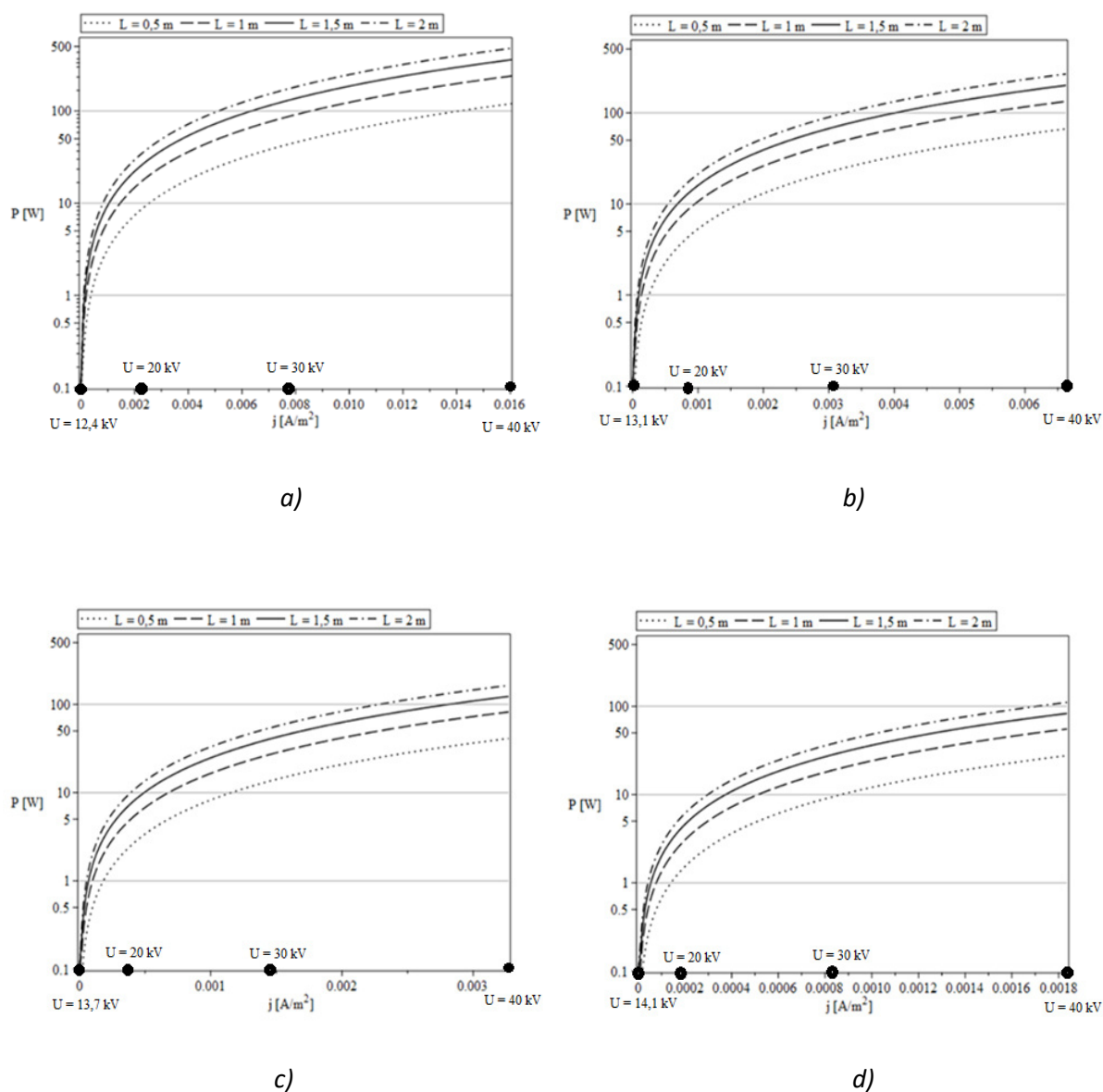
c)



d)

Obr. 35 Účinnost odlučování jednotlivých velikostních frakcí částic v závislosti na proudové hustotě a proměnném průměru sběrací elektrody  $R$ . Délky elektrod (čtyři průběhy v každém grafu) byly voleny v krocích 0,5 m, 1 m, 1,5 m a 2 m. Jsou zobrazeny konfigurace:

- a)  $R = 60$  mm,  $r_0 = 0,5$  mm,  $U_0 = 12355$  V, b)  $R = 80$  mm,  $r_0 = 0,5$  mm,  $U_0 = 13095$  V,  
 c)  $R = 100$  mm,  $r_0 = 0,5$  mm,  $U_0 = 13671$  V, d)  $R = 120$  mm,  $r_0 = 0,5$  mm,  $U_0 = 14142$  V.

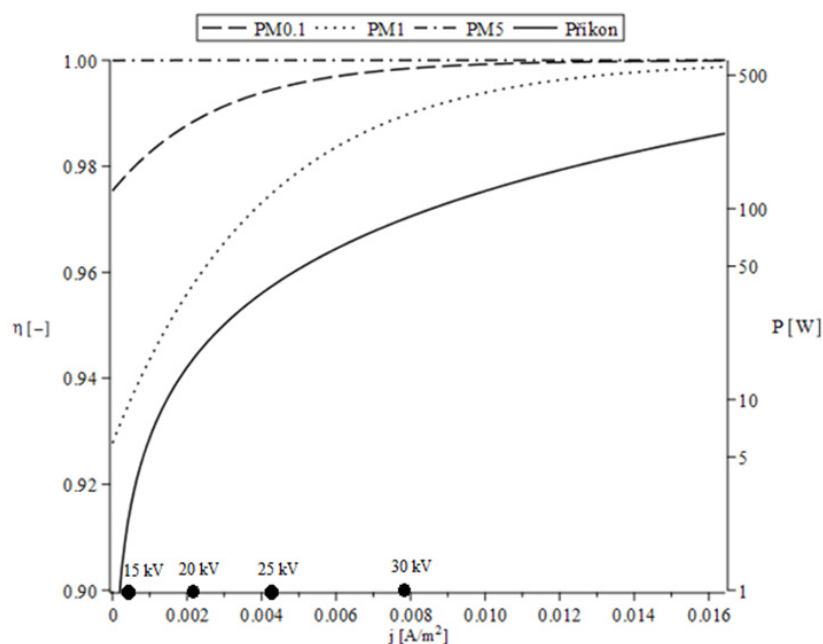


Obr. 36 Grafy příkonu elektrostatického odlučovače v závislosti na proudové hustotě (korespondující s přivedeným napětím) a proměnném průměru sběrací elektrody  $R$ . Délky elektrod (čtyři průběhy v každém grafu) byly voleny v krocích 0,5 m, 1 m, 1,5 m a 2 m. Jsou zobrazeny konfigurace:

- a)  $R = 60$  mm,  $r_0 = 0,5$  mm,  $U_0 = 12355$  V, b)  $R = 80$  mm,  $r_0 = 0,5$  mm,  $U_0 = 13095$  V,  
c)  $R = 100$  mm,  $r_0 = 0,5$  mm,  $U_0 = 13671$  V, d)  $R = 120$  mm,  $r_0 = 0,5$  mm,  $U_0 = 14142$  V.

Pro doplnění scénářů jsou vykresleny grafy se dvěma y-osami (Obr. 37 až 39), jak pro příkon, tak pro účinnost. Křivka příkonu, znázorněna plnou čarou, je v logaritmickém měřítku, tudíž podobnost průběhu s průběhem účinnosti je ryze náhodná. Účinnost odlučování je vždy vykreslena pro velikostní frakce PM0.1, PM1 a PM5, zaznačené odlišnými vzory čar. Pro lepší orientaci v grafech je k nim vždy přiřazena tabulka odečtených hodnot pro vícero přivedených napětí. V tabulce jsou rovněž přiřazeny účinnosti odlučivosti jednotlivých velikostních frakcí, elektrické příkony odlučovače, celkový elektrický proud a proudová hustota. Hladiny elektrického napětí v tabulkách byly zvoleny tak, aby bylo možné zařízení při těchto hodnotách provozovat. Zmiňovat hodnoty napětí, vzdalující se od uvedených, by tak postrádalo smysl. Grafy a tabulky jsou zde doplněny pouze pro 3 nejextrémnější geometrie.

Z grafů a tabulek by se dalo usoudit, že jak při růstu poloměru nabíjecí elektrody, tak i elektrody sběrací, by se za stejného napětí zlepšovaly parametry, a to jak odlučivost, tak příkon. Při detailnějším zkoumání je patrné, že při nárůstu poloměru nabíjecí elektrody se příkon mění skokově, a tak nebude udržitelné zařízení provozovat při malých příkonech, přesto, že v tabulkách s odečtem údajů (Tab. 14–16) figurují příznivé hodnoty. Při malém zanesení by mohlo dojít k poruše a elektrický proud mezi elektrodami by dále neprocházel. Ve srovnání s tímto skokovým nárůstem příkonu, je pokles účinnosti při zvětšujícím se poloměru sběrací elektrody nepatrný, a poskytuje tedy lepší manévrovací prostor pro chod odlučovače. Při výběru geometrické konfigurace by se k tomu mělo přihlížet a volit poloměr nabíjecí elektrody co nejmenší, ale i s přihlédnutím k její životnosti, co se všech typů namáhání a mezí únavy týče. Při volbě většího průměru pak dbát i na proporcionální zvětšení průměru elektrody sběrací.

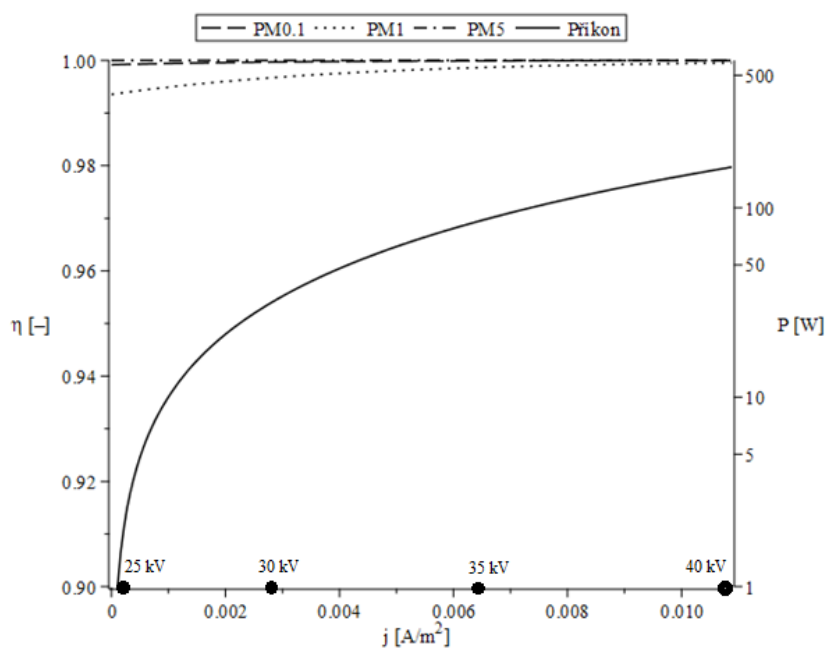


Obr. 37 Graf závislosti účinnosti a příkonu na proudové hustotě (přivedeném napětí). Účinnost je vykreslená pro částice o průměru 0,1, 1 a 5  $\mu\text{m}$ . Platí pro konfiguraci:

$$R = 60 \text{ mm}, r_0 = 0,5 \text{ mm}, L = 1 \text{ m}, U_0 = 12355 \text{ V}.$$

Tab. 14 Vynesené číselné hodnoty odlučivosti (pro PM0.1, PM1 a PM5), příkonu, elektrického proudu a proudové hustoty z Obr. 37 pro čtyři různá napětí.

R = 60 mm, r = 0,5 mm, L = 1 m, U <sub>0</sub> = 12 355 V					
U [kV]	I [mA]	j [mA/m <sup>2</sup> ]	P [W]	η [%]	
15	0,19	0,52	2,9	PM0.1	97,9
				PM1	93,6
				PM5	99,9
20	0,82	2,18	16,4	PM0.1	98,8
				PM1	95,8
				PM5	99,9
25	1,75	4,63	43,7	PM0.1	99,5
				PM1	97,7
				PM5	99,9
30	2,96	7,84	88,7	PM0.1	99,8
				PM1	99,0
				PM5	99,9

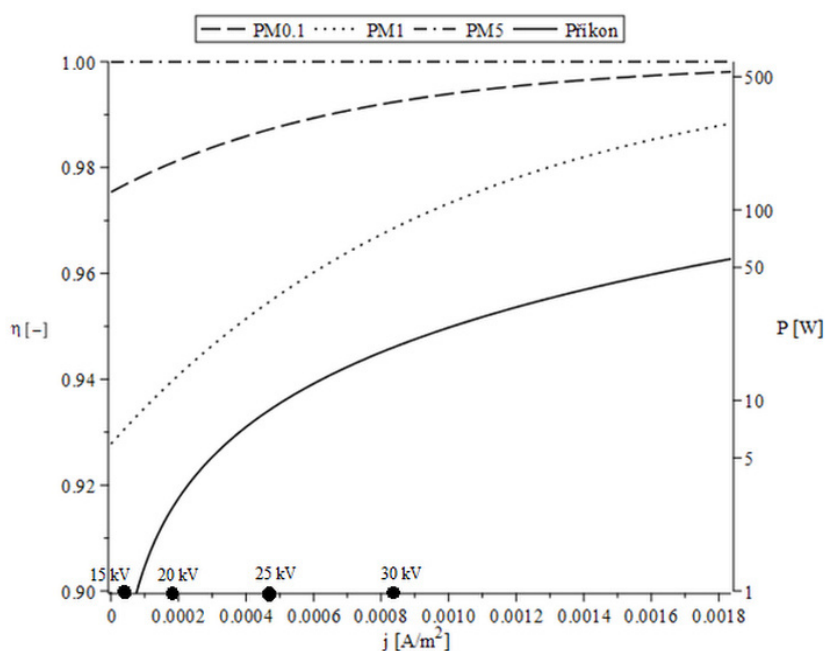


Obr. 38 Graf závislosti účinnosti a příkonu na proudové hustotě (přivedeném napětí). Účinnost je vykreslená pro částice o průměru 0,1, 1 a 5  $\mu\text{m}$ . Platí pro konfigurace:

$$R = 60 \text{ mm}, r_0 = 2 \text{ mm}, L = 1 \text{ m}, U_0 = 24315 \text{ V}.$$

Tab. 15 Vynesené číselné hodnoty odlučivosti (pro PM0.1, PM1 a PM5), příkonu, elektrického proudu a proudové hustoty z Obr. 38 pro čtyři různá napětí.

R = 60 mm, r = 2 mm, L = 1 m, U <sub>0</sub> = 24 315 V					
U [kV]	I [mA]	j [mA/m <sup>2</sup> ]	P [W]	η [%]	
25	0,10	0,27	2,5	PM0.1	99,9
				PM1	99,4
				PM5	99,9
30	1,08	2,88	32,5	PM0.1	99,9
				PM1	99,7
				PM5	99,9
35	2,43	6,44	85,0	PM0.1	99,9
				PM1	99,9
				PM5	99,9
40	4,10	10,88	164,1	PM0.1	99,9
				PM1	99,9
				PM5	99,9



Obr. 39 Graf závislosti účinnosti a příkonu na proudové hustotě (přivedeném napětí). Účinnost je vykreslená pro částice o průměru 0,1, 1 a 5  $\mu\text{m}$ . Platí pro konfiguraci:  
 $R = 120 \text{ mm}$ ,  $r_0 = 0,5 \text{ mm}$ ,  $L = 1 \text{ m}$ ,  $U_0 = 14142 \text{ V}$

Tab. 16 Vynesené číselné hodnoty odlučivosti (pro PM0.1, PM1 a PM5), příkonu, elektrického proudu a proudové hustoty z Obr. 39 pro čtyři různá napětí.

$R = 120 \text{ mm}$ , $r = 0,5 \text{ mm}$ , $L = 1 \text{ m}$ , $U_0 = 14142 \text{ V}$					
U [kV]	I [mA]	j [mA/m <sup>2</sup> ]	P [W]	$\eta$ [%]	
15	0,01	0,02	0,2	PM0.1	97,6
				PM1	92,9
				PM5	99,9
20	0,14	0,19	2,8	PM0.1	98,1
				PM1	94,0
				PM5	99,9
25	0,35	0,46	8,6	PM0.1	98,7
				PM1	95,4
				PM5	99,9
30	0,62	0,83	18,7	PM0.1	99,2
				PM1	96,8
				PM5	99,9

## 5.4 Validace modelu na komerčních odlučovačích

Před tím, než bylo přistoupeno k samotnému výběru a vyhotovení konstrukčního návrhu, byla provedena předběžná validace výpočtového modelu s pomocí známých parametrů dvou komerčních, na trhu dostupných elektrických odlučovačích, Öekotube a Zumikron. Při validaci se vycházelo z dostupných informací z testování jednotlivých zařízení a oficiálních údajů výrobců. I tak byla validace znesnadněna neúplností informací, jako jsou konfigurace elektrod a jejich přesné rozměry anebo těžko odhadnutelnými parametry, jako je přesná geometrie nabíjecí elektrody, která nejvíce ovlivňuje vznik koronového výboje. Výpočet byl veden se zahrnutím drsnosti povrchu elektrod ( $f = 0,6$ ), dle rovnice (5.22). Zanesena do výpočtu byla relativní permitivita částic 3,7, jakožto ve výpočtech nejčastěji se vyskytující hodnota. Účinnost byla počítána a porovnávána dle teoretického D–A výpočetního vztahu (viz rovnice (5.37)).

### 5.4.1 Öekotube

V Tab. 17 jsou porovnány s výpočetním modelem dostupné údaje z testování. Dle rozsahu napětí udávané výrobcem ( $U = 15\text{--}30\text{ kV}$ ) je patrné, že je uvažováno mnohem nižší počáteční napětí, což může být důsledek například menšího poloměru zakřivení nebo upravenou geometrií nabíjecí elektrody na testovaných sadách. U prvního případu je dobré zmínit, že při výpočtu účinnosti dle Smidthe by účinnost odloučení vycházela v rozmezí 97,9 % – 98,7 %, což je ještě o něco bližší hodnotám zjištěným ve zdroji [28].

Tab. 17 Porovnání dostupných testovacích parametrů a výsledků odlučovače Öekotube z TU Graz s vygenerovanými výsledky při validaci [28].

		1 – TU Graz	Validace
<b>R</b>	[mm]	75	75
<b>r</b>	[mm]	5	5
<b>L</b>	[mm]	2000	2000
<b>U<sub>0</sub></b>	[kV]	–	23,3
<b>U</b>	[kV]	23,3–30 (15–30*)	23,3–30
<b>η<sub>(PM1)</sub></b>	[%]	96,7–97,5	99,6–99,8
<b>P</b>	[W]	20–30	10,4–58,7

\* šedě jsou vypsány hodnoty stanovené výrobcem, nejedná se tedy o výsledky testování v daných případech [26]



*Tab. 18 Porovnání dostupných testovacích parametrů a výsledků odlučovače Ökotube z [30] s vygenerovanými výsledky při validaci [28].*

		<b>2 – Carroll, J.</b>	<b>Validace</b>
<b>R</b>	[mm]	65	65
<b>r</b>	[mm]	5	5
<b>L</b>	[mm]	1 300	1 300
<b>U<sub>0</sub></b>	[kV]	–	22,1
<b>U</b>	[kV]	24 (15–30)	24
<b>η<sub>(PM1)</sub></b>	[%]	67,5	97,7
<b>P</b>	[W]	20–30	9,9

#### 5.4.2 Zumikron

Validace a srovnání vzhledem k elektrostatickému odlučovači Zumikron probíhalo za neznalosti konfigurace při testovacím nastavení. Ve zdroji [28] byly uvedeny pouze některé parametry a výsledné rozmezí hodnot. Geometrie byla odhadnuta podle dostupných fotografií a náčrtů odlučovače Zumikron a dle znalosti běžně používaných komponent. Byly tak zvoleny dvě pozměněné konfigurace pro lepší porovnání a kontrast výsledků. Za povšimnutí stojí skoro ideální shoda příkonů. Oproti tomu účinnost při odlučování částic o 1 μm vychází při výpočtech vždy přes 80 %.

*Tab. 19 Porovnání dostupných testovacích parametrů a výsledků odlučovače Zumikron se zvolenou konfigurací elektrod – 1 [28].*

		<b>Zumikron</b>	<b>Validace – konfigurace 1</b>
<b>R</b>	[mm]	–	65
<b>r</b>	[mm]	–	2
<b>L</b>	[mm]	–	1 000
<b>U<sub>0</sub></b>	[kV]	–	12,5
<b>U</b>	[kV]	19–22,5	19–22,5
<b>η<sub>(PM1)</sub></b>	[%]	20–76	83,1–88,1
<b>P</b>	[W]	5–15	12,2–26,7

Tab. 20 Porovnání dostupných testovacích parametrů a výsledků odlučovače Zumikron se zvolenou konfigurací elektrod – 2 [28].

		Zumikron	Validace – konfigurace 2
<b>R</b>	[mm]	–	80
<b>r</b>	[mm]	–	1,5
<b>L</b>	[mm]	–	1 000
<b>U<sub>0</sub></b>	[kV]	–	13,2
<b>U</b>	[kV]	19–22,5	19–22,5
<b><math>\eta_{(PM1)}</math></b>	[%]	20–76	80,8–85,4
<b>P</b>	[W]	5–15	6,9–15,8

Předběžná validace probíhala za neúplné znalosti všech potřebných parametrů z testování a měření na daných odlučovačích. U zařízení Zumikron se nepodařilo dohledat geometrická konfigurační elektrod. Chybějící údaje tak byly na základě dostupných zdrojů a fotografické dokumentace v nich odhadnuty, aby se co možná nejvíce blížily realitě. V mnohém byla při validaci nalezena shoda a lze ji tak hodnotit jako částečně úspěšnou.

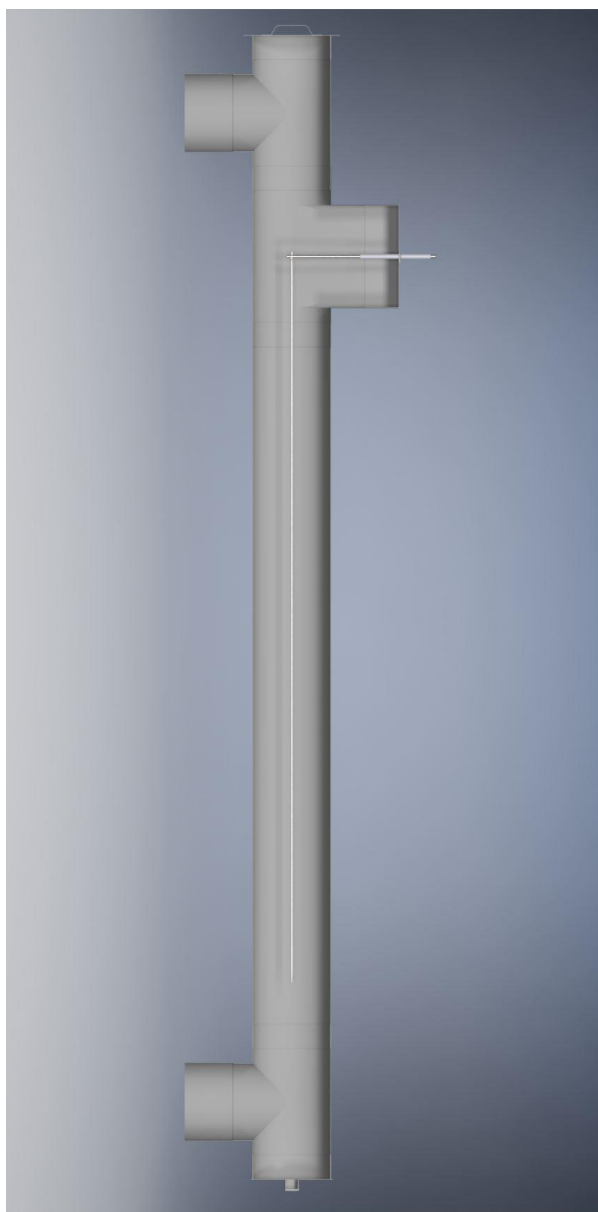
### 5.5 Zvolená geometrická konfigurace a návrh odlučovače

Na základě rešerše a sestavených scénářů konkrétních konfigurací byla s přihlédnutím k dostupným komponentám a možnostem navržena konstrukční podoba odlučovače, viz Obr. 40. Pohled na sestavu navrženého odlučovače je pak v příloze na konci práce. Jedná se suchý odlučovač bez automatického systému čištění funkčních ploch elektrod. Zvolena konfigurace je blíže popsána v Tab. 21. Tabulka je doplněna o provozní parametry a údaje vyplývající z matematického modelu. Detailní pohled na prototyp elektrostatického odlučovače se zakótovanými rozměry je umístěn formou přílohy na konci práce. Výpočty probíhaly jako veškerá výpočetní část této práce v programovém prostředí softwaru Maple [37]. Výsledná konfigurace není přímo výsledkem numerické optimalizace, ale volba na základě vyhotovených scénářů s posouzením vlivu měnící se geometrie. Tak jako u scénářů, je i zvolená konfigurace počítána a navržena pro jmenovitý tepelný výkon 25 kW kotle Verner A 251.

V Tab. 22 a 23 vystupují veličiny a konstanty obsažené ve výpočtu a dosazované do rovnic v kapitole 5.2. Další veličiny vyplývající z výpočtu jsou uvedeny i v Tab. 24. Dynamická

viskozita a hustota spalin byly dopočítány v prostředí Maple pomocí funkce „properties“ (databáze CoolProp) na základě známých stavových veličin. Reynoldsovo kritérium vykazuje hodnotu pro turbulentní proudění, přesto se nenachází v ideálním rozmezí dle [39].

Výpočet intenzity elektrického pole byl tentokrát veden již pro praktické aplikace dle [21], tedy s faktorem drsnosti povrchu ( $f = 0,6$ ). Srovnání dvou výpočtů s totožnou geometrií pro dokonale hladké plochy a pro drsné plochy elektrod lze dohledat na Obr. 47, kde je rozdílný průběh promítnut do grafu účinnosti v závislosti na proudové hustotě.



*Obr. 40 Konstrukční návrh prototypu elektrostatického odlučovače. V dolní části zleva vstupují do odlučovače zaprášené spaliny. Po průchodu aktivní oblastí mezi nabíjecí a sběrací elektrodou pak v horní části na levé straně odprášené spaliny odcházejí.*

Tab. 21 Základní technologické údaje a parametry k navrženému elektrostatickému odlučovači částic.

Aplikace:	Kotel na pelety	
Výkon spalovacího zařízení:	25 kW	
Suchý/mokrý odlučovač:	Suchý	
Čištění:	Manuální	
Průměr sběrací elektrody:	160 mm	
Průměr nabíjecí elektrody:	3 mm	
Délka elektrod:	1,5 m	
Napětí na nabíjecí elektrodě:	18–25 kV	
Požadované napětí na zdroji:	230 AC (12 V DC)	
Příkon:	7,6–37,3 W	
Hodnota procházejícího elektrického proudu:	0,42–1,49 mA	
Odlučivost:	PM0.1	97,3–99,3 %
	PM1	92,4–97,0 %
	PM5	99,90 %

Tab. 22 Hodnoty dosazené do matematického výpočtového modelu elektrostatického odlučovače částic.

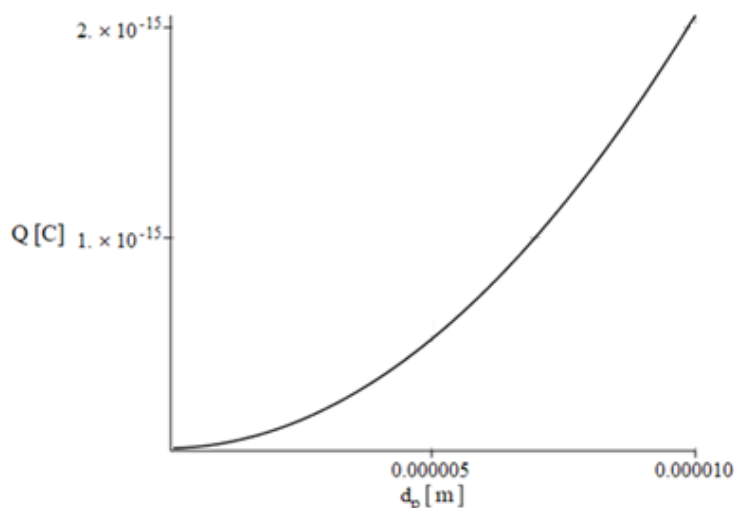
Teplota okolí:	$T_0 = 20$	°C
Relativní vlhkost prostředí:	$\varphi = 0,7$	–
Atmosférický tlak okolí:	$p = 98,6 \cdot 10^3$	Pa
Teplota spalin na výstupu z kotle:	$t = 160$	°C
	$T = 433,15$	K
Součinitel přebytku vzduchu pro roštové ohniště [41]:	$\alpha = 1,35$	–
Hmotnostní tok paliva [43]:	$M_{hm} = 5,8$	kg/h
Relativní permitivita částic [45]:	$\varepsilon_r = 5$	–
Hustota prachových částic [46]:	$\rho_p = 1600$	kg/m <sup>3</sup>

*Tab. 23 Konstanty vystupující v matematickém výpočtovém modelu.*

Bolzmannova konstanta:	$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$	J/kg
Elektrická permitivita vakua [14]:	$\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$	$C^2/N \cdot m^2$
Pohyblivost iontů za normálních podmínek [14]:	$b_0 = 2 \cdot 10^{-4}$	$m^2/V$

*Tab. 24 Parametry a hodnoty platné pro odlučovač o zvolené konfiguraci, vycházející z výpočtového modelu.*

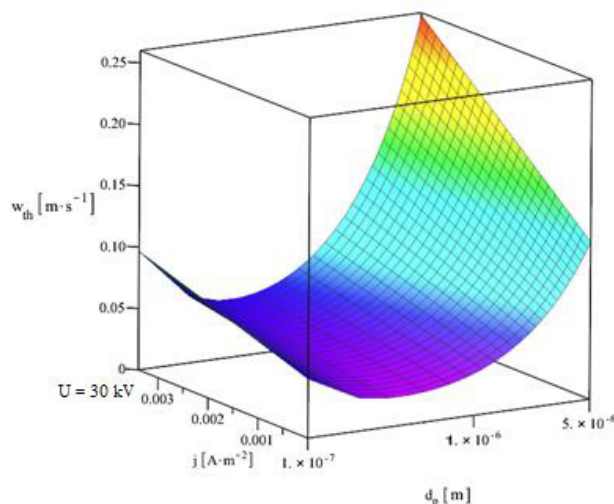
Dynamická viskozita spalin:	$\eta_d = 2,44 \cdot 10^{-5}$	kg/m·s
Hustota spalin:	$\rho_{sp} = 0,815$	kg/m <sup>3</sup>
Reynoldsovo podobnostní kritérium:	Re = 3085	–
Rychlost spalin v odlučovači:	c = 0,58	m/s
Počáteční (koronové) napětí:	$U_0 = 13,23$	kV



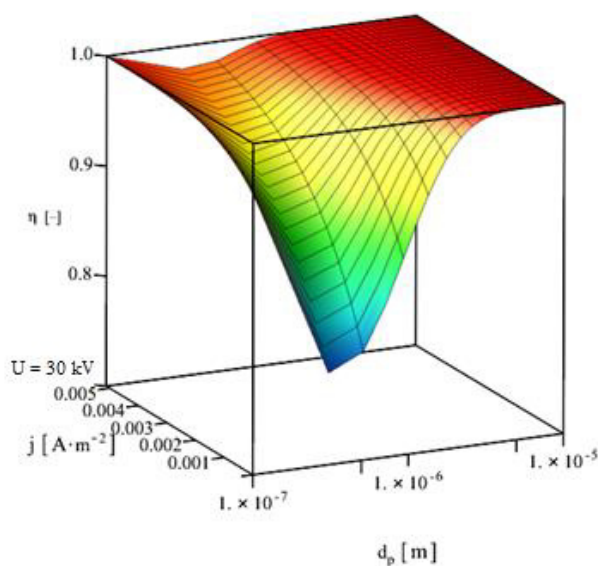
*Obr. 41 Graf elementárního náboje částic v závislosti na velikosti frakce při fixním přivedeném napětí o hodnotě 20 kV.*

Na Obr. 41 je vykreslena závislost velikosti elementárního náboje na velikosti částice. Náboj částice poté vystupuje ve výpočtu odlučovací rychlosti. Graf odlučovací (driftové) rychlosti,

tedy rychlosti částice směrem k odlučovací elektrodě, je vykreslen na Obr. 42. Vyobrazen je v závislosti na velikosti odlučované částice a proudové hustotě. Rychlost je vyšší s tím, jak se zvětšuje průměr částice a přivedené elektrické napětí. Na Obr. 43 je pak stejně jako v podkapi- tole se scénáři grafické zpracování závislosti účinnosti na velikosti frakce a proudové hustotě. Z grafu je zřejmý pokles účinnosti mezi velikostmi částic 0,1 a 1  $\mu\text{m}$ . S rostoucím elektrickým napětím (popř. proudovou hustotou) mezi elektrodami účinnost odlučivosti roste.

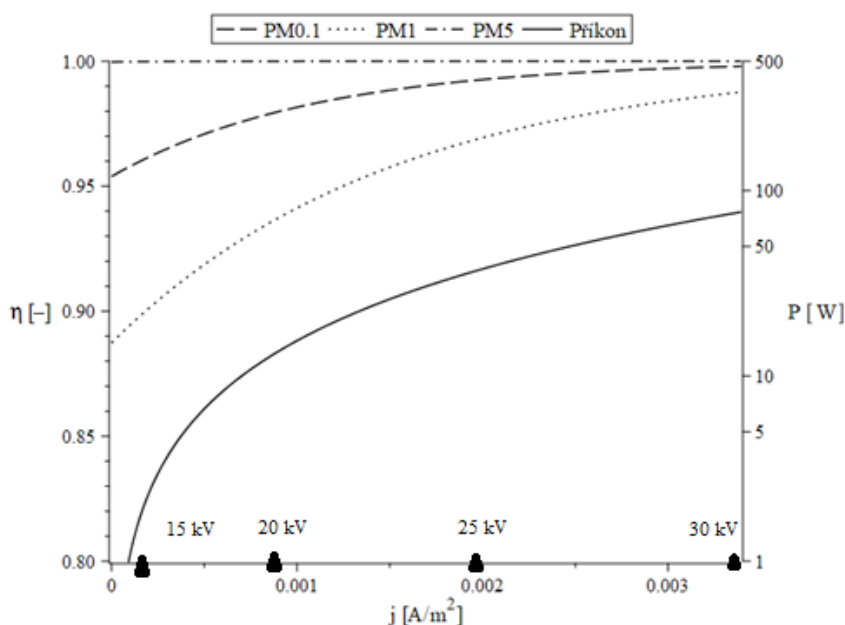


Obr. 42 Graf odlučovací (driftové) rychlosti v závislosti na průměru prachové částice a proudové hustotě, respektive přivedeném napětí do 30 kV.



Obr. 43 Graf závislosti účinnosti na průměru odlučovaných částic a proudové hustotě pro navrženou konfiguraci elektrod. Rozmezí proudové hustoty na y-ose odpovídá rozmezí přivedeného napětí  $U = 13,2 - 30$  kV.

Teoreticky vypočtené parametry navrženého odlučovače, pro různá napájecí napětí, jsou vyobrazeny na Obr. 44 a vyčísleny v Tab. 25.



*Obr. 44 Graf závislosti účinnosti a příkonu odlučovače na proudové hustotě pro zvolenou konfiguraci elektrod. Účinnost je vykreslena pro částice o průměru 0,1, 1 a 5  $\mu$ m.*

*Tab. 25 Vynesené číselné hodnoty odlučivosti (pro PM0.1, PM1 a PM5), příkonu, elektrického proudu a proudové hustoty z Obr. 44 pro čtyři různá napájecí napětí.*

R = 80 mm, r = 1,5 mm, L = 1,5 m, U <sub>0</sub> = 13 226 kV					
U [kV]	I [mA]	j [mA/m <sup>2</sup> ]	P [W]	$\eta$ [%]	
15	0,12	0,16	1,8	PM0.1	96,2
				PM1	90,1
				PM5	99,9
20	0,67	0,90	13,5	PM0.1	98,1
				PM1	93,9
				PM5	99,9
25	1,49	2,00	37,3	PM0.1	99,3
				PM1	97,0
				PM5	99,9
30	2,56	3,39	76,7	PM0.1	99,8
				PM1	98,8
				PM5	99,9

Při zanesení elektrod bude docházet k poklesu účinnosti odlučování. Při zanesení se bude měnit napětí mezi elektrodami, intenzita elektrického pole a tím ovlivňovat výsledná účinnost. Přibližný (simulovaný) efekt postupného zanášení je možné vyčíst v Tab. 26, kde se taková změna odráží v závislosti účinnosti odlučování různě velkých velikostní frakcí prachových částic na napájecím napětí. Citlivější změna účinnosti nastane v oblasti menších frakcí a při nižších napájecích napětích.

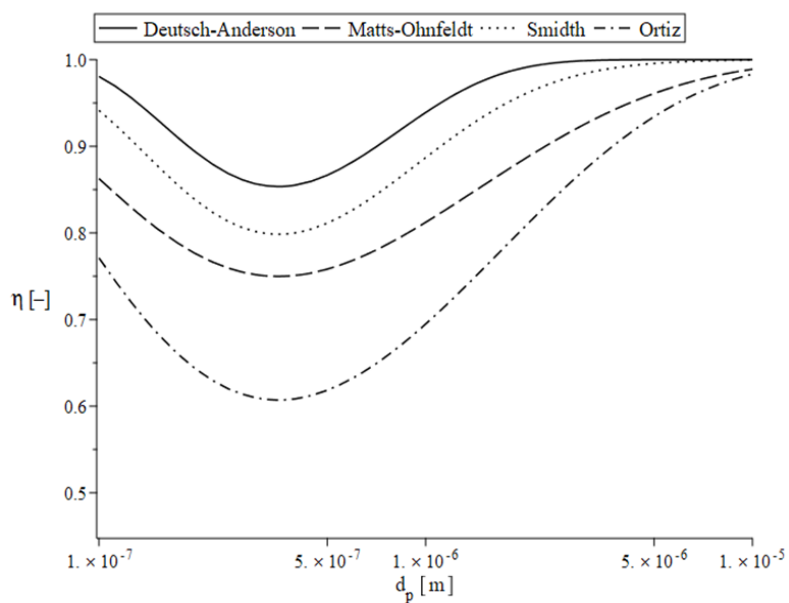
Tab. 26 Vliv změny napětí na elektrodách na účinnost (dle D–A metody) například při zanášení elektrod prachem, pro velikostní frakce o velikosti 0,1–5  $\mu\text{m}$ .

<b>Podrobnější pohled na vliv změny napětí na odlučivost frakcí (dle D-A metody)</b>			
	18 kV	20 kV	22 kV
PM0.1	$\eta = 97,3 \%$	$\eta = 98,1 \%$	$\eta = 98,7 \%$
PM1	$\eta = 92,4 \%$	$\eta = 93,9 \%$	$\eta = 95,3 \%$
PM2.5	$\eta = 99,4 \%$	$\eta = 99,6 \%$	$\eta = 99,8 \%$
PM5	$\eta = 99,9 \%$	$\eta = 99,9 \%$	$\eta = 99,9 \%$

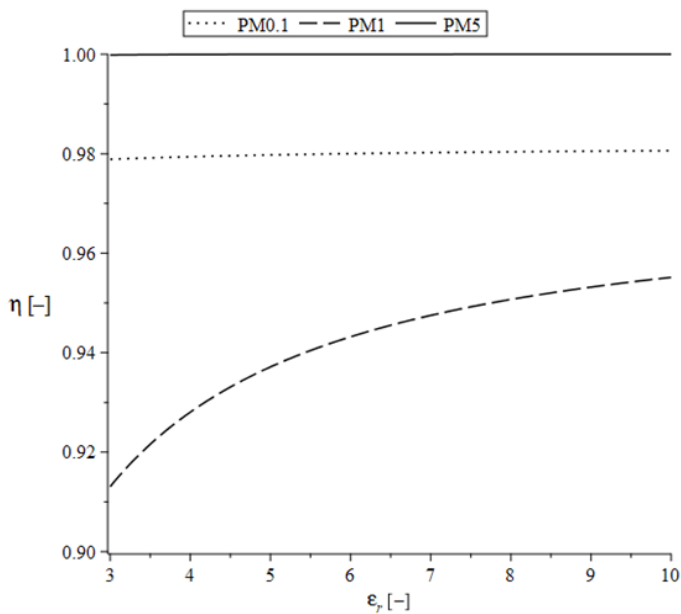
Výpočet účinnosti odlučování byl doposud uváděn dle vzorce (5.37) Deutsch–Andersonovou metodou. Jedná se však o jeden z nejstarších používaných vztahů pro výpočet účinnosti elektrostatického odlučovače. Za tu dobu vzniklo hned několik jeho modifikací, viz výše. Pro modifikace uvedené v podkapitole 5.2.4 byl proto sestaven graf srovnávající účinnosti odlučování podle výpočtů uváděných různými autory (viz Obr. 45). Ten může mimo jiné posloužit pro srovnání jednotlivých metod s reálnými hodnotami zjištěnými při testování modelu po jeho sestavení.

Pro výpočetní model byla zvolena hodnota relativní permitivity  $\epsilon_r = 5$ . Pro většinu frakcí, především těch větších, její změna velký vliv na odlučivost nemá. Nicméně na Obr. 46 je patrné, že pro frakci PM1 se účinnost může měnit v řádu jednotek procent pro rozmezí hodnot relativní permitivity 3–10.

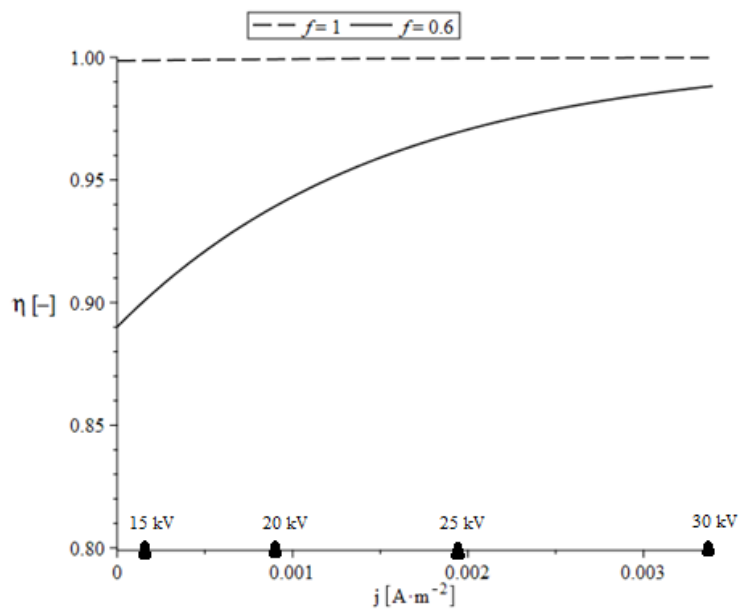




Obr. 45 Graf Závislosti odlučivosti na velikosti frakce pro čtyři výpočetní metody zmíněné v podkapitole 5.2.4 za fixního přiváděného napětí 20 kV.



Obr. 46 Graf závislosti odlučivosti na relativní permitivitě částice pro tři různé velikostní frakce (PM0.1, PM1 a PM5) za fixně stanoveného napětí na 20 kV.



Obr. 47 Porovnání průběhů závislosti odlučivosti na proudové hustotě (popř. napětí) pro dokonale hladké stěny elektrod ( $f = 1$ ) a pro elektrostatický odlučovač s drsnými stěnami, tedy blížíci se podmínkám za provozu ( $f = 0,6$ ). Průběhy křivek odlučivosti platí pro částice o průměru  $1\ \mu\text{m}$ .

## **ZÁVĚR**

Při spalování tuhých paliv, včetně biomasy, vznikají tuhé znečišťující látky. Tyto škodlivé prachové částice emitované spalovacími zařízeními, vznikají v celém spektru velikostních frakcí. Zejména pak jejich nejmenší velikostní frakce (do PM<sub>10</sub>) mohou být nebezpečné a mít nežádoucí vliv na lidský organismus. Primárně se emise těchto škodlivin dá omezit výběrem vhodného paliva a jeho řízeným spalováním. Jako sekundární opatření bývá voleno, u velkých spalovacích zařízení a v energetických provozech, čištění spalin pomocí elektrostatických odlučovačů. U lokálních topenišť – krbů, krbových vložek, kamen nebo teplovodních kotlů, která ke znečištění ovzduší přispívají velkou měrou, se tak zatím neděje. Z tohoto důvodu byla předkládaná diplomová práce zaměřena na možnou aplikaci elektrostatického odlučovače pro domovní spalovací zařízení. Praktickým výstupem práce by měl být konstrukční návrh experimentálního elektrostatického odlučovače pro automatický teplovodní kotel.

V rešeršní části práce jsou popsány principy elektrostatického odlučování, typy elektrických výbojů a praktické aplikace těchto procesů. Jsou popsány a porovnány některé již vyvinuté a testované elektrostatické odlučovače pro kotle malých výkonů. Z rešerše vyplynulo, že většina existujících elektrostatických odlučovačů pro domovní kotle existuje zatím ve fázi prototypů, ve výčtu zařízení jsou ale i případy komerčně dostupných odlučovačů. Z dostupných informací vyplývá, že kromě odlučivosti je, vzhledem k omezeným možnostem instalace, kladen důraz na velikost zařízení, a především cílovou cenu. Odlučovač by neměl svou cenou přesahovat cenu samotného spalovacího zařízení. I to je patrně jedna z příčin, proč na doposud většině malých spalovacích zařízení nenajdeme automatické systémy čištění spalin.

Pro potřeby konstrukčního návrhu odlučovače byl sestaven matematický model predikující výkonové parametry trubkového elektrostatického odlučovače na základě parametrů spalin zvoleného spalovacího zařízení, zvolené geometrie odlučovače a jeho napájecího napětí. Tento model byl předběžně ověřen srovnáním predikovaných hodnot s parametry komerčních a již testovaných odlučovačů. Na základě modelu byly poté vykresleny grafy několika scénářů, které uvažovaly rozdílné geometrické konfigurace odlučovače a jeho proměnné napájecí napětí. Na základě takto získaných poznatků byl vytvořen návrh experimentálního elektrostatického odlučovače a vytvořena jeho dokumentace. Výsledná konfigurace navrženého suchého trubkového elektrostatického odlučovače bez automatických čistících mechanismů byla vybrána pro průměr sběrací elektrody 160 mm, což odpovídá běžně používaným rozměrům kouřovodů. Průměr nabíjecí elektrody byl zvolen 3 mm. Délka elektrod odlučovače byla stanovena

na 1,5 m. Na základě úvah bylo doporučeno rozmezí napájecího napětí odlučovače 18–25 kV. Při podkročení doporučených hodnot může dojít ke ztrátě výboje a přerušení provozu odlučovače. Při větším překročení napájecího napětí by se rapidně zvednul elektrický příkon a provoz zařízení se mohl výrazněji prodražit. Z rešerše vyplynulo, že nejobtížnější bývá odloučit částice o průměru přibližně 0,5  $\mu\text{m}$ . Při dodržení požadovaného rozmezí napájecího napětí by účinnost odlučování navrženého odlučovače měla pro částice PM1 dosahovat hodnot 92,4–97 %. Předpokládá se, že zařízení bude v budoucnu postaveno a jak matematický model, tak vlastní odlučovač validován. Porovnáním výsledků z modelu a experimentu pak může v budoucnu posloužit k dalšímu zpřesnění a případnému zdokonalení konstrukce odlučovače.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MOLCHANOV, Oleksandr at al. Electrostatic precipitation as a method to control the emissions of particulate matter from small-scale combustion units. *Journal of Cleaner Production*. 2020, (246), 1-9.
- [2] BOLOGA, A. Development and Study of an Electrostatic Precipitator for Small Scale Wood Combustion. *International Journal of Plasma Environmental Science & Technology* [online]. 2011, 5(2), 168-173 [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/230558063\\_Development\\_and\\_study\\_of\\_an\\_electrostatic\\_precipitator\\_for\\_small\\_scale\\_wood\\_combustion](https://www.researchgate.net/publication/230558063_Development_and_study_of_an_electrostatic_precipitator_for_small_scale_wood_combustion)
- [3] KANTOR, Tomáš. *VLIV VLHKOSTI DŘEVA NA PRODUKCI PLYNNÝCH EMISÍ*. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké Učení Technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Martin Lisý, Ph.D.
- [4] OBERNBERGER, Ingwald. *The Pellet Handbook: The production and thermal utilisation of biomass pellets*. První. London, UK: Earthscan Ltd, 2010. ISBN 978-1-84407-631-4.
- [5] KOŠTÁL, Jan. *Vliv provozních parametrů kotle na přítomnost jemných částic ve spalínách* [online]. Brno, 2017 [cit. 2020-02-17]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/101032?zp\\_id=101032](https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/101032?zp_id=101032). Diplomová práce. Vysoké Učení Technické v Brně.
- [6] NUSSBAUMER, Thomas, Claudia CZASCH, Norbert KLIPPEL, Linda JOHANSSON a Claes TULLIN. *Particulate Emissions from Biomass Combustion in IEA Countries: Survey on Measurements and Emission Factors* [online]. Zürich: International Energy Agency (IEA) Bioenergy Task 32 Swiss Federal Office of Energy (SFOE), 2008 [cit. 2017-11-06]. ISBN 3-908705-18-5. Dostupné z: [http://www.ieabcc.nl/publications/Nussbaumer\\_et\\_al\\_IEA\\_Report\\_PM10\\_Jan\\_2008.pdf](http://www.ieabcc.nl/publications/Nussbaumer_et_al_IEA_Report_PM10_Jan_2008.pdf).
- [7] BRUNNER, Thomas. *State-of-the-art of small-scale biomass combustion systems: Presentations of the final project seminar "High efficiency & low emissions". EU-UltraLowDust: High efficiency - low emissions* [online]. Wels, Rakousko, 2014 [cit. 2017-11-06]. Dostupné z: [http://www.ultralowdust.eu/fileadmin/user\\_upload/public/Final-Project-Seminar/WSED2014\\_High-efficiency-low-emissions\\_Presentations.ZIP](http://www.ultralowdust.eu/fileadmin/user_upload/public/Final-Project-Seminar/WSED2014_High-efficiency-low-emissions_Presentations.ZIP).
- [8] KIM, Myungjoon et al. A novel electrostatic precipitator-type small air purifier with a carbon fiber ionizer and an activated carbon fiber filter. *Journal of Aerosol Science*. Republic of Korea, 2018, (117), 63-73.
- [9] SZWEDA, Martin. *ODLUČOVAČE TZL PRO KOTLE MALÝCH VÝKONŮ* [online]. Brno, 2019 [cit. 2020-02-18]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116957?zp\\_id=116957](https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116957?zp_id=116957). Bakalářská práce. Vysoké Učení Technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Pavel Milčák.
- [10] SITEK, Tomáš. *ULTRAJEMNÉ ČÁSTICE GENEROVANÉ SPALOVACÍM PROCESEM* [online]. Brno, 2018 [cit. 2020-02-18]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/108967?zp\\_id=108967](https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/108967?zp_id=108967). Diplomová práce. Vysoké Učení Technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Pospíšil Ph.D.
- [11] PARKER, Ken. *Electrical operation of electrostatic precipitators*. První. Bodmin, Cornwall: The Institution of Electrical Engineers, 2003. ISBN 0-85296-137-5.
- [12] MARTIŠOVITŠ, Viktor. *ZÁKLADY FYZIKY PLAZMY*. Bratislava, 2004. Učební text. Univerzita Komenského Bratislava.

- [13] BÖHM, Jaroslav. *Elektrické odlučování a odlučovače*. První. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1959. ISBN 301-05-35.
- [14] PARKER, K. R. *Applied Electrostatic precipitation*. První. Chapman & Hall India, R. Seshadri, 32 second main road, CIT East, Madras, 600 035, India: Chapman & Hall, 1997. ISBN 978-94-010-7193-2.
- [15] THEODORE, Louis. *Air pollution control equipment*. První. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2008. ISBN 978-0-470-20967-7.
- [16] VEJVODA, Josef, Pavel MACHAČ a Petr BURYAN. *Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů*. První. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2003. ISBN 80-7080-517-X.
- [17] HEMERKA, Jiří. *Odlučování tuhých částic*. První. Praha: České vysoké učení technické, 1994. ISBN 80-01-01088-0.
- [18] AWAD, M. B. Ozone Generation in an Electrostatic Precipitator With a Heated Corona Wire. *Journal of the Air Pollution Control Association*. 1975, **25**(4), 369-374. DOI: 10.1080/00022470.1975.10470092.
- [19] HUANG, YIFAN & HUANG, S. & ZHENG, Q. & SHEN, X. & WANG, S. & HAN, P. & LIU, ZHENSHENG & YAN, KEPING. *Recent progress of dry electrostatic precipitation for PM2.5 emission control from coal-Fired boilers*. 2015, (9), 69-126.
- [20] SINGH, Renu a Ashish SHUKLA. A review on methods of flue gas cleaning from combustion of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2014, (29), 854–864 [cit. 2020-06-09]. Dostupné z: [www.elsevier.com/locate/rser](http://www.elsevier.com/locate/rser)
- [21] BENITEZ, Jaime. *Process Engineering and Design for Air Pollution Control*. První. Upper Saddle River, United States: Pearson Education (US), 1993. ISBN 0137232144.
- [22] MIZNER, Martin. *Electric strength verification of electrostatic precipitator insulator* [online]. Praha, 2016 [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/65289>. Diplomová práce. České Vysoké Učení Technické.
- [23] HANFORD Vit Plant. *HANFORD Vit Plant* [online]. Richland, Washington, USA: U.S. Department of Energy Office of River Protection, 2007 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <http://www.hanfordvitplant.com/articles/electrodes-installed-law-gas-treatment-system>
- [24] *Electrostatic precipitator (ESP) services: THE EASY SOLUTION OF ELECTRICAL INSULATION WITH ESP INSULATOR* [online]. Kolkata, India, 2014 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://controlairpollution.wordpress.com/2014/09/25/-the-easy-solution-of-electrical-insulation-with-esp-insulator/>
- [25] HORÁK, Jiří. Co musí splnit nový kotel na tuhá paliva po roce 2020? Porovnání emisních požadavků pro kotle do 300 MW. In: *Www.tzb-info.cz* [online]. Ostrava: VŠB, TU Ostrava, Výzkumné energetické centrum, 2015 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://vytapieni.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/12909-co-musi-splnit-novy-kotel-na-tuha-paliva-po-roce-2020>
- [26] Electrostatic precipitator OekoTube for your wood stoves. *Oekosolve* [online]. [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://oekosolve.ch/en/products/oekotube/>
- [27] SCHMATLOCH, Volker. Design and characterisation of an electrostatic precipitator for small heating appliances. *Journal of Electrostatics* [online]. 2005, (63), 85–100 [cit. 2020-06-09]. Dostupné z: [www.elsevier.com/locate/elstat](http://www.elsevier.com/locate/elstat)
- [28] OBERNBERGER, Ingwald. *Survey on the present state of particle precipitation devices for residential biomass combustion with a nominal capacity up to 50 kW in IEA Bioenergy Task32 member countries* [online]. In: . TU Graz, 2011, s. 1-114 [cit. 2020-

- 05-04]. Dostupné z: <https://www.bios-bioenergy.at/uploads/media/Filter-study-IEA-Dez-2011.pdf>
- [29] FRABOULET, Isaline. *ECONOMIC AND TECHNICAL EVALUATION OF THE ENERGY AND ENVIRONMENTAL PERFORMANCES OF THE BEST AVAILABLE TECHNIQUES FOR THE REDUCTION OF FINE DUST AND ORGANIC COMPOUND EMISSIONS FROM RESIDENTIAL WOOD COMBUSTION APPLIANCES* [online]. 2012, , 1-118 [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/272088117>
- [30] CARROLL, John a John FINNAN. Use of electrostatic precipitators in small-scale biomass furnaces to reduce particulate emissions from a range of feedstocks. *Biosystems Engineering* [online]. 2017, (163), 94–102 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: [www.elsevier.com/locate/issn/15375110](http://www.elsevier.com/locate/issn/15375110)
- [31] Partikelabscheider „Zumikron“ von Kutzner + Weber ist jetzt BAFA-förderfähig. *Www.baulinks.de* [online]. [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: <https://www.baulinks.de/webplugin/2014/2138.php4>
- [32] *AL-TOP: Der Partikelfilter für automatisch beschickte Biomasse-Feuerungsanlagen* [online]. In: . Schröder Abgastechnologie, 2017, s. 1-4 [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://www.schraeder.com/al-top>
- [33] Der Partikelabscheider Airjek 1. In: *Www.kutzner-weber.de* [online]. Maisach, 2016 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://kutzner-weber.de>
- [34] Die Feinstaubabscheiner der Serie Airjekt 1. In: *Www.kutzner-weber.de* [online]. Maisach, 2020 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://kutzner-weber.de>
- [35] BOLOGA, Andrei. *Electrostatic Precipitator of Fine Particles from Biomass Combustion Facilities* [online]. In: . Karlsruhe Institute of Technology - Energy Center, s. 1-2 [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: [https://www.itc.kit.edu/downloads/CAROLA-Electrostatic\\_Precipitators.pdf](https://www.itc.kit.edu/downloads/CAROLA-Electrostatic_Precipitators.pdf)
- [36] New small scale electrostaticprecipitator (ESP) technology. In: *Www.ultralowdust.eu* [online]. Austria [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://ultralowdust.eu>
- [37] Maplesoft. *Www.maplesoft.com* [online]. Waterloo, ON Canada: Maplesoft, a division of Waterloo Maple Inc. 2020. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.maplesoft.com/products/Maple/>
- [38] FENG Z., LONG Z., ADAMIAK K. A critical review of models used in numerical simulation of electrostatic precipitators. *IAPGOŚ*. 2016, **2016**(4), 9-17.
- [39] ZAMANY, Jamshid. *Modeling of Particle Transport in Commercial Electrostatic Precipitators*. První. Kongens Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark, 1992. ISBN 87-984457-0-7.
- [40] VALENTA, Vladimír. *Dimenzování vzduchospalinových cest krbů* [online]. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://vytapieni.tzb-info.cz/kominy-a-kourovody/6616-dimenzovani-vzduchospalinovych-cest-krbu>
- [41] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. Třetí. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o. Brno, 2019. ISBN 978-80-214-5769-0.
- [42] HORÁK, Jiří. *Úvod do teorie spalování tuhých paliv* [online]. In: . Ostrava: Výzkumné energetické centrum VŠB - TUO, s. 1-45 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://vec.vsb.cz/export/sites/vec/.content/galerie-souboru/194-spalovani-tuhych-paliv-1.pdf>

- [43] Návod k obsluze a instalaci automatického kotle Verner A251.1. *Kotle-verner* [online]. Bratislava, 2020 [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <http://www.kotle-verner.cz/data/sharedfiles/1717/a251-1-b022-66931-070708.pdf>
- [44] LYČKA, Zdeněk. *Dřevní Peleta II: Spalování v malých zdrojích tepla*. První. Krnov: LING Vydavatelství s.r.o., 2011. ISBN ISBN 978-80-904914-1-0.
- [45] ZOU, Zhilong. Analysis of Dielectric Particles Charging and Motion in the Direct Current Ionized Field. *CSEE JOURNAL OF POWER AND ENERGY SYSTEMS* [online]. 2016, 2(1), 88–94 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7439087&tag=1>
- [46] ZHAI, Jinghao. Size-resolved chemical composition, effective density, and optical properties of biomass burning particles. *Atmospheric Chemistry and Physics* [online]. Shanghai, China, 2017, 17, 7481–7493 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/acp-17-7481-2017>



## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Příklad normy o tvaru peletky z EN 14961. Převzato z [4].	19
Obr. 2 Vliv koncentrace prachových částic o různých velikostech v závislosti na podmínkách spalování. Převzato z [6].	21
Obr. 3 Množství prachových částic o různých velikostech v závislosti na výběru paliva. Převzato z [7].	22
Obr. 4 Schopnost pronikání částic do lidského organismu v závislosti.	22
Obr. 5 Závislost účinnosti odlučování na velikosti částic. Převzato z [11].	23
Obr. 6 Mikroskopická fotografie spalin ukazující přítomnost částic v podobě zrn i dýmu. Převzato z [11].	24
Obr. 7 Druhy elektrických výbojů v závislosti na elektrickém napětí a proudu. Převzato z [12].	25
Obr. 8 Porovnání nabíjecí charakteristiky při negativní a pozitivní ionizaci, dle uspořádání elektrod. Převzato z [11].	27
Obr. 9 Vliv koncentrace nabitých částic na průběh elektrostatického potenciálu pole. Převzato z [12].	28
Obr. 10 Koronový výboj v uspořádání „trubka – drát“. Písmeny R1 a R2 jsou označeny poloměry nabíjecí (drátové) elektrody (1) a méně zakřivené elektrody sběrné (2). 3 – ionizační vrstva, 4 – vnější oblast výboje (nedochází k ionizaci). Převzato z [12].	29
Obr. 11 Vznik korony. Převzato z [15].	29
Obr. 12 Voltampérová charakteristika elektrostatického odlučovače. Proud mezi elektrodami prochází, pokud se hodnota napětí pohybuje mezi napětím kritickým $U_{kr}$ a hranicí přeskokového napětí $U_p$ . Převzato z [16].	30
Obr. 13 Porovnání rozdílů koronového počátečního ( $\odot$ ) a jiskrového napětí ( $\bullet$ ) při různých teplotách a tlacích u trubkového odlučovače s poměrem poloměrů elektrod $R/r = 62,5$ . Převzato z [14].	31
Obr. 14 Měrný odpor vrstvy částic. Převzato z [17].	32
Obr. 15 Schéma zobrazující historii elektrostatického odlučování, dle dosažené účinnosti. Převzato z [19].	33
Obr. 16 Orientační rozdělení odlučovacích technologií. Převzato z [9].	34
Obr. 17 Pohled do útroby trubkového elektrostatického odlučovače. Převzato z [23].	35
Obr. 18 Příklady tvarů nabíjecích elektrod. Převzato z [11].	37
Obr. 19 Výběr některých běžně používaných keramických izolátorů dostupných na trhu. Převzato z [24].	38
Obr. 20 Dvě základní provedení malých trubkových elektrostatických odlučovačů. Model „top“ umístěný na komíně (vlevo) a „in-line“ zasazený do spalinovodu mezi spalovací zařízení a komín (vpravo). Převzato z [26].	39
Obr. 21 Instalace elektrostatického odlučovače částic Ökotube s detailem nabíjecí části zařízení. Převzato z [26].	42
Obr. 22 Ukázka zapojeného odlučovače Ökotube s příkladem běžné údržby (vpravo). Převzato z [26].	42
Obr. 23 Možné provedení zapojení elektrostatického odlučovače Zumikron. Převzato z [31].	44
Obr. 24 Elektrostatický odlučovač částic Al-top (vlevo) s nabíjecí elektrodou, která je v reálu zasunutá do odlučovače v dolní části (vpravo nahoře) a ukázka čistého a zaneseného kovového lože (vpravo dole). Převzato z [32].	45
Obr. 25 Provedení a design elektrostatického odlučovače částic Airjekt 1 typu „Outdoor–Top“. Převzato z [34].	47

Obr. 26 Elektrostatický odlučovač částic Carola (vlevo); zachycený koronový výboj v ionizační části odlučovače (vpravo). Převzato z [35].	48
Obr. 27 Schéma odlučovače s popisem jeho částí. Převzato z [35].	49
Obr. 28 Konstrukce a instalace elektrostatického odlučovače vyvinutého APP (Norsko). Převzato z [29].	50
Obr. 29 Provedení a popis elektrostatického odlučovače Ruff-kat. Převzato z [36].	53
Obr. 30 Fyzikální veličiny a jejich vztahy při elektrostatickém odlučování. Převzato z [38].	56
Obr. 31 Princip spalování. Převzato z [5].	58
Obr. 32 Vykreslení teoretické odlučovací rychlosti jako funkce velikosti částice pro tři různé intenzity elektrického pole mezi elektrodami při teplotě 150 °C a relativní permitivitě $\epsilon_r = 10$ . Převzato z [14]	68
Obr. 33 Účinnost odlučování jednotlivých velikostních frakcí částic v závislosti na proudové hustotě a proměnném průměru nabíjecí elektrody $r_0$ . Délky elektrod (čtyři průběhy v každém grafu) byly voleny v krocích 0,5 m, 1 m, 1,5 m a 2 m. Jsou zobrazeny konfigurace: a) $R = 60$ mm, $r_0 = 0,5$ mm, $U_0 = 12355$ V, b) $R = 60$ mm, $r_0 = 1$ mm, $U_0 = 17325$ V, c) $R = 60$ mm, $r_0 = 1,5$ mm, $U_0 = 21136$ V, d) $R = 60$ mm, $r_0 = 2$ mm, $U_0 = 24315$ V.	71
Obr. 34 Grafy příkonu elektrostatického odlučovače v závislosti na proudové hustotě (korespondující s přivedeným napětím) a proměnném průměru nabíjecí elektrody $r_0$ . Délky elektrod (čtyři průběhy v každém grafu) byly voleny v krocích 0,5 m, 1 m, 1,5 m a 2 m. Jsou zobrazeny konfigurace: a) $R = 60$ mm, $r_0 = 0,5$ mm, $U_0 = 12355$ V, b) $R = 60$ mm, $r_0 = 1$ mm, $U_0 = 17325$ V, c) $R = 60$ mm, $r_0 = 1,5$ mm, $U_0 = 21136$ V, d) $R = 60$ mm, $r_0 = 2$ mm, $U_0 = 24315$ V.	72
Obr. 35 Účinnost odlučování jednotlivých velikostních frakcí částic v závislosti na proudové hustotě a proměnném průměru sběrací elektrody $R$ . Délky elektrod (čtyři průběhy v každém grafu) byly voleny v krocích 0,5 m, 1 m, 1,5 m a 2 m. Jsou zobrazeny konfigurace: a) $R = 60$ mm, $r_0 = 0,5$ mm, $U_0 = 12355$ V, b) $R = 80$ mm, $r_0 = 0,5$ mm, $U_0 = 13095$ V, c) $R = 100$ mm, $r_0 = 0,5$ mm, $U_0 = 13671$ V, d) $R = 120$ mm, $r_0 = 0,5$ mm, $U_0 = 14142$ V. ...	74
Obr. 36 Grafy příkonu elektrostatického odlučovače v závislosti na proudové hustotě (korespondující s přivedeným napětím) a proměnném průměru sběrací elektrody $R$ . Délky elektrod (čtyři průběhy v každém grafu) byly voleny v krocích 0,5 m, 1 m, 1,5 m a 2 m. Jsou zobrazeny konfigurace: a) $R = 60$ mm, $r_0 = 0,5$ mm, $U_0 = 12355$ V, b) $R = 80$ mm, $r_0 = 0,5$ mm, $U_0 = 13095$ V, c) $R = 100$ mm, $r_0 = 0,5$ mm, $U_0 = 13671$ V, d) $R = 120$ mm, $r_0 = 0,5$ mm, $U_0 = 14142$ V.	75
Obr. 37 Graf závislosti účinnosti a příkonu na proudové hustotě (přivedeném napětí). Účinnost je vykreslena pro částice o průměru 0,1, 1 a 5 $\mu$ m. Platí pro konfiguraci: $R = 60$ mm, $r_0 = 0,5$ mm, $L = 1$ m, $U_0 = 12355$ V.	77
Obr. 38 Graf závislosti účinnosti a příkonu na proudové hustotě (přivedeném napětí). Účinnost je vykreslena pro částice o průměru 0,1, 1 a 5 $\mu$ m. Platí pro konfiguraci: $R = 60$ mm, $r_0 = 2$ mm, $L = 1$ m, $U_0 = 24315$ V.	78
Obr. 39 Graf závislosti účinnosti a příkonu na proudové hustotě (přivedeném napětí). Účinnost je vykreslena pro částice o průměru 0,1, 1 a 5 $\mu$ m. Platí pro konfiguraci: $R = 120$ mm, $r_0 = 0,5$ mm, $L = 1$ m, $U_0 = 14142$ V.	79
Obr. 40 Konstrukční návrh prototypu elektrostatického odlučovače. V dolní části zleva vstupují do odlučovače zaprášené spaliny. Po průchodu aktivní oblastí mezi nabíjecí a sběrací elektrodou pak v horní části na levé straně odprášené spaliny odcházejí.	83
Obr. 41 Graf elementárního náboje částic v závislosti na velikosti frakce při fixním přivedeném napětí o hodnotě 20 kV.	85
Obr. 42 Graf odlučovací (driftové) rychlosti v závislosti na průměru prachové částice a proudové hustotě, respektive přivedeném napětí do 30 kV.	86

Obr. 43 Graf závislosti účinnosti na průměru odlučovaných částic a proudové hustotě pro navrženou konfiguraci elektrod. Rozmezí proudové hustoty na y-ose odpovídá rozmezí přivedeného napětí $U = 13,2 - 30$ kV. ....	86
Obr. 44 Graf závislosti účinnosti a příkonu odlučovače na proudové hustotě pro zvolenou konfiguraci elektrod. Účinnost je vykreslena pro částice o průměru 0,1, 1 a 5 $\mu\text{m}$ . ....	87
Obr. 45 Graf Závislosti odlučivosti na velikosti frakce pro čtyři výpočetní metody zmíněné v podkapitole 5.2.4 za fixního přiváděného napětí 20 kV. ....	89
Obr. 46 Graf závislosti odlučivosti na relativní permitivitě částice pro tři různé velikostní frakce (PM0.1, PM1 a PM5) za fixně stanoveného napětí na 20 kV. ....	89
Obr. 47 Porovnání průběhů závislostí odlučivosti na proudové hustotě (popř. napětí) pro dokonale hladké stěny elektrod ( $f = 1$ ) a pro elektrostatický odlučovač s drsnými stěnami, tedy blížíci se běžně aplikovaným komponentům ( $f = 0,6$ ). Průběhy křivek odlučivosti platí pro částice o průměru 1 $\mu\text{m}$ . ....	90

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Porovnání poměrových obsahů uhlíku, vodíku a kyslíku v palivu (konkrétně odshora u dřevních pelet, rašeliny a stébelnin) [4].	19
Tab. 2 Přípustná hmotnost dusíku, síry a chloru na 1 kg paliva [4].	19
Tab. 3 Základní obecné a technické údaje o elektrostatickém odlučovači částic Ökotube [28; 29; 26].	41
Tab. 4 Základní obecné a technické údaje o elektrostatickém odlučovači částic Zumikron [29; 28].	43
Tab. 5 Základní obecné a technické údaje o elektrostatickém odlučovači částic Al-top [29; 28].	44
Tab. 6 Základní obecné a technické údaje o elektrostatickém odlučovači částic Airjekt 1 [33].	46
Tab. 7 Základní obecné a technické údaje o elektrostatickém odlučovači částic Carola [28; 35].	47
Tab. 8 Základní obecné a technické údaje o elektrostatickém odlučovači Residential ESP [29; 28].	49
Tab. 9 Základní obecné a technické údaje o elektrostatickém odlučovači Dry ESP vyvinutém společností Robert Bosch (Německo) [28].	51
Tab. 10 Základní obecné a technické údaje o elektrostatickém odlučovači částic Ruff-kat ESP [36].	52
Tab. 11 Srovnávací tabulka výše uvedených elektrostatických odlučovačů.	54
Tab. 12 Parametry zvoleného spalovacího zařízení [43].	62
Tab. 13 Prvkový rozbor a výhřevnost použitého paliva [44].	63
Tab. 14 Vynesené číselné hodnoty odlučivosti (pro PM0.1, PM1 a PM5), příkonu, elektrického proudu a proudové hustoty z Obr. 35 pro čtyři různá napětí.	77
Tab. 15 Vynesené číselné hodnoty odlučivosti (pro PM0.1, PM1 a PM5), příkonu, elektrického proudu a proudové hustoty z Obr. 36 pro čtyři různá napětí.	78
Tab. 16 Vynesené číselné hodnoty odlučivosti (pro PM0.1, PM1 a PM5), příkonu, elektrického proudu a proudové hustoty z Obr. 37 pro čtyři různá napětí.	79
Tab. 17 Porovnání dostupných testovacích parametrů a výsledků odlučovače Ökotube z TU Graz s vygenerovanými výsledky při validaci [28].	80
Tab. 18 Porovnání dostupných testovacích parametrů a výsledků odlučovače Ökotube z [30] s vygenerovanými výsledky při validaci [28].	81
Tab. 19 Porovnání dostupných testovacích parametrů a výsledků odlučovače Zumikron se zvolenou konfigurací elektrod – 1 [28].	81
Tab. 20 Porovnání dostupných testovacích parametrů a výsledků odlučovače Zumikron se zvolenou konfigurací elektrod – 2 [28].	82
Tab. 21 Základní technologické údaje a parametry k navrženému elektrostatickému odlučovači částic.	84
Tab. 22 Hodnoty dosazené do matematického výpočtového modelu elektrostatického odlučovače částic.	84
Tab. 23 Konstanty vystupující v matematickém výpočtovém modelu.	85
Tab. 24 Parametry a hodnoty platné pro odlučovač o zvolené konfiguraci, vycházející z výpočtového modelu.	85
Tab. 25 Vynesené číselné hodnoty odlučivosti (pro PM0.1, PM1 a PM5), příkonu, elektrického proudu a proudové hustoty z Obr. 39 pro čtyři různá napájecí napětí.	87
Tab. 26 Vliv změny napětí na elektrodách na účinnost (dle D–A metody) například při zanášení elektrod prachem, pro velikostní frakce o velikosti 0,1–5 $\mu\text{m}$ .	88

## **SEZNAM PŘÍLOH**

- 1 Výkresová dokumentace návrhu

